
图灵新知

首次从一位内部人士的视角生动描述了发现的整个过程。

——彼得·希格斯，2013年诺贝尔物理学奖获得者

希格斯粒子是如何找到的？

来自史上最大物理实验的内部故事

[英] 乔恩·巴特沃思 / 著 黄日俊 / 译

Smashing Physics


中国工信出版集团


人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

数字版权声明

在瑞法边境地下百米处深藏着一个全长27千米的庞然大物，那就是世界上最大最强的粒子加速器、人类有史以来建造的最大最复杂的实验设施，也是世界上最大的机器——大型强子对撞机（LHC）。

自2008年9月启动以来，LHC在不断打破对撞能量记录的同时，也在持续开辟人类知识的新疆界。而2012年7月CERN公布的在LHC上的希格斯玻色子大发现，是粒子物理乃至科学在过去几十年里最重大的发现之一。它不仅为粒子物理的标准模型拼上了最后一块拼图，解决了“粒子物理的核心问题”，也在世界各地的公众当中引发了持续的热情和关注。

那么希格斯玻色子究竟是什么？它又是如何被发现的？除了搜寻希格斯玻色子，LHC还做了什么？在CERN的生活又是什么样子的？

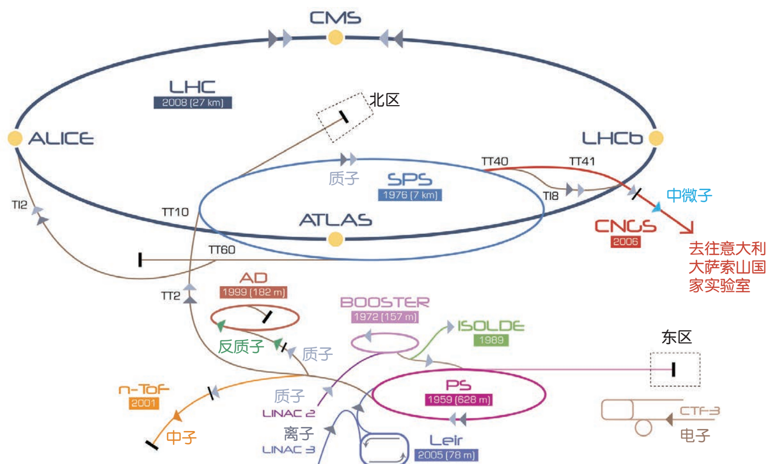
在这本首次由内部人士讲述希格斯玻色子发现过程的书中，CERN资深物理学家乔恩·巴特沃思就将带你深入体验发现的整个过程，了解LHC背后的科学、技术、政治和文化，感受现代粒子物理大型国际合作项目中的生活点滴。

封面图片：2015年6月3日，花了两年时间升级的大型强子对撞机（LHC）生成了第一束稳定的质子束，以13 TeV的对撞能量重启质子对撞，开始第二阶段运行。该图展示了ATLAS当天记录到的一个质子－质子对撞事例。颜色各异的弧线表示受螺线管磁场影响而弯曲的粒子运动轨迹，它们由内层探测器记录的撞击点重建而成。黄色和暗红色、深绿色条块表示液氩热量计和闪烁材料热量计截留的粒子能量大小。相同颜色的弧线来自同一对撞顶点，而几个不同的对撞顶点预示着其中存在多个质子－质子相互作用（ATLAS Experiment © 2015 CERN,http://cds.cern.ch/record/2022598）。



彩图 1　LHC 地理位置图

黄色小圆环为全长 7 千米的超级质子同步加速器，大圆环为全长 27 千米的大型强子对撞机。红色和蓝色圆环示意两道质子束运动轨迹和方向（入射箭头表示质子束注入），它们相交于四处，分别为四个主要探测器所在地。黑色实线表示 LHC 环道的八个等分区域，ATLAS 在第一区域，CMS 在第五区域。

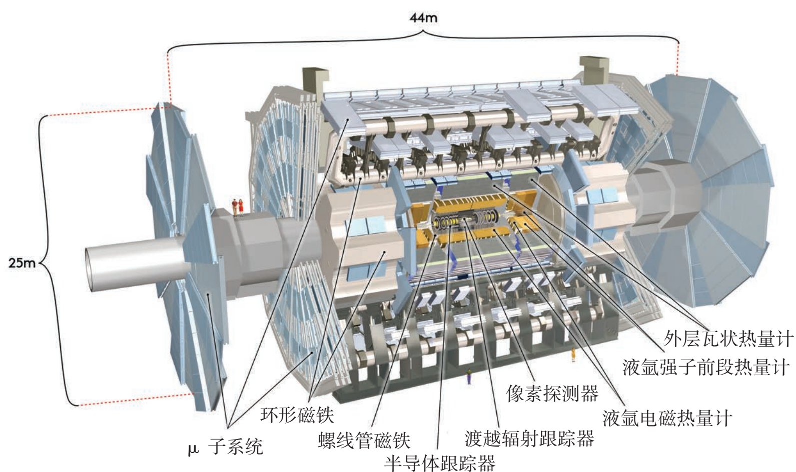


彩图 2　CERN 加速器设施群

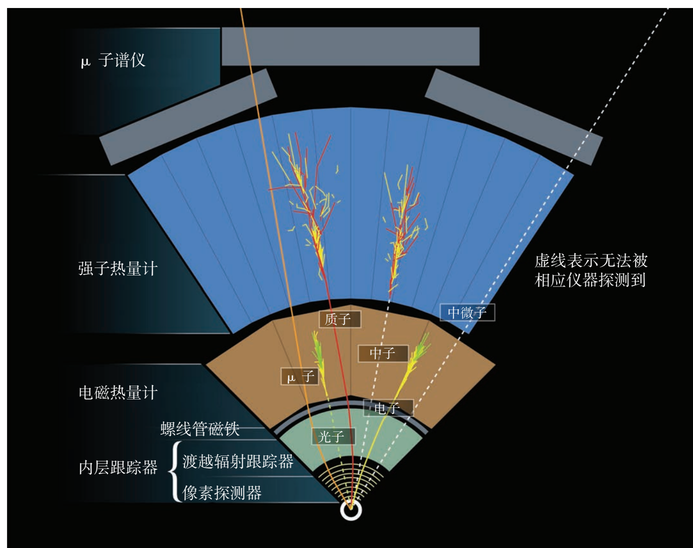
LHC 为大型强子对撞机，SPS 为超级质子同步加速器，PS 为质子同步加速器，AD 为反质子减速器，CTF3 为紧凑直线加速器测试设施，CNGS 为从 CERN 到大萨索山中微子项目，ISOLDE 为在线同位素分离器装置，LEIR 为低能离子环，LINAC 为直线加速器，n-ToF 为中子飞行时间测量装置。



彩图 3　ATLAS 控制室主楼壁画

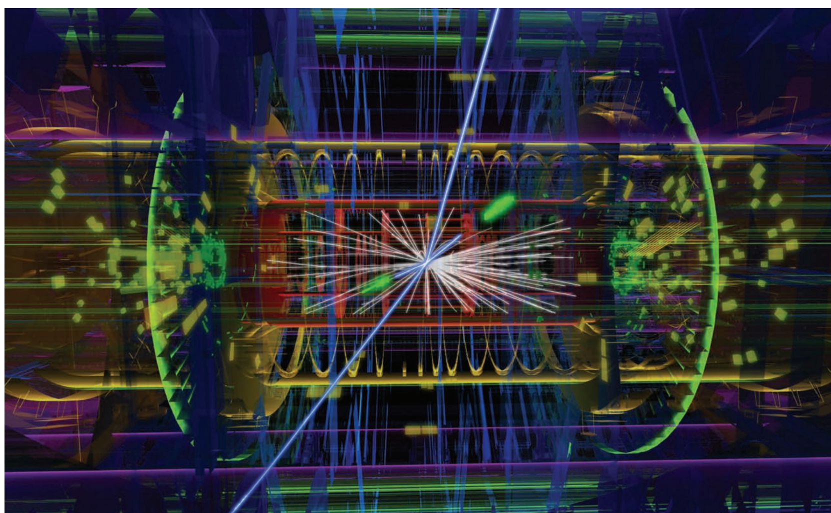


彩图 4　ATLAS 探测器计算机模拟图



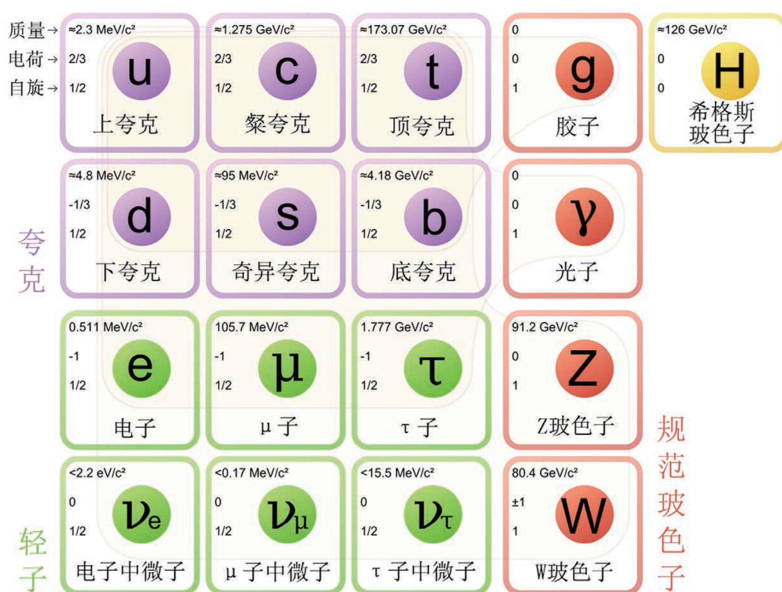
彩图 5　ATLAS 探测器工作原理

对撞生成的粒子经过内层跟踪器、热量计和 μ 子谱仪时表现出不同性质（虚线表示无法被相应仪器探测到）。μ 子可以被所有仪器探测到，最后飞出探测器；光子和电子停留在电磁热量计，但光子无法被内层跟踪器探测到；质子和中子停留在强子热量计，但中子无法被内层跟踪器和电磁热量计探测到；中微子无法被任何仪器探测到，径直飞出探测器。



彩图 6　ATLAS 上的一个对撞事例

这里生成了两个 μ 子和两个电子：延伸到探测器之外的蓝色轨迹预示着 μ 子的存在；两道较短的蓝色轨迹（在内层跟踪器中）紧接着绿色团簇（在热量计中），预示着电子的存在。



彩图 7　标准模型的基本粒子

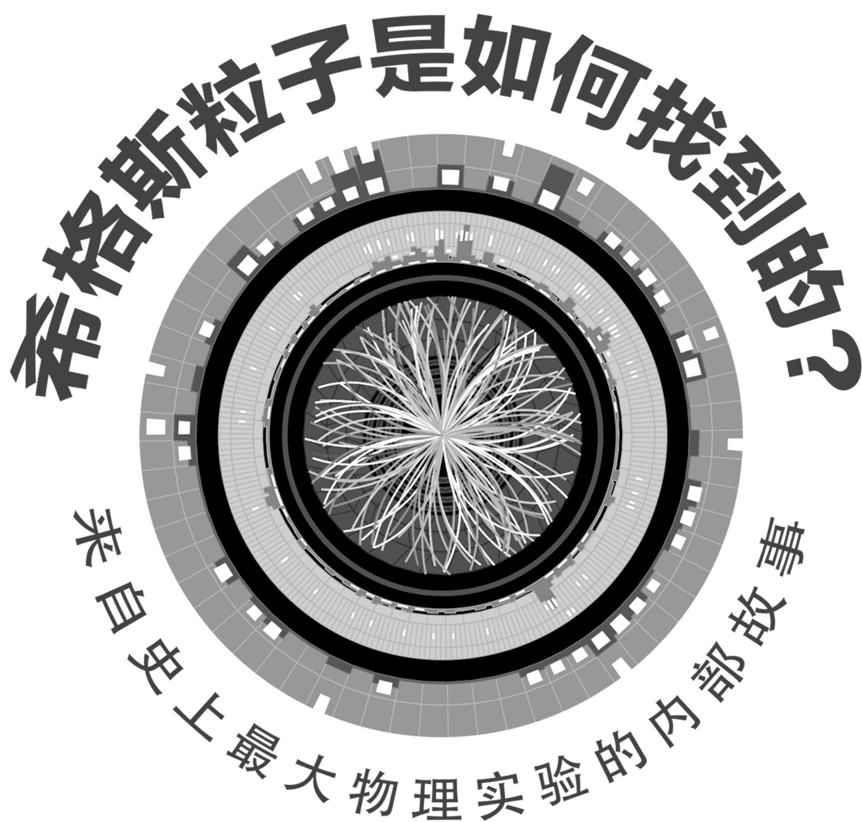
三代 12 个费米子(夸克和轻子,每个均有反粒子)以及四个规范玻色子。为了解释质量起源,引入希格斯玻色子。(棕色区域表示相应规范玻色子可以与区域内的费米子耦合。)

大自然的四种基本相互作用及其性质			引力相互作用	弱相互作用	电磁相互作用	强相互作用
				(电弱相互作用)		
耦合方式			质量—能量	味	电荷	色荷
作用范围			无穷远	10^{-18} 米	无穷远	10^{-15} 米
受作用粒子			所有粒子	夸克、轻子	带电粒子	夸克、胶子
传递粒子			引力子(假想)	W^+、W^-、Z^0 玻色子	光子	胶子
相对强度	夸克尺度	10^{-18} 米	10^{-41}	0.8	1	25
		3×10^{-17} 米	10^{-41}	10^{-4}	1	60
	原子尺度,10^{-14} 米		10^{-36}	10^{-7}	1	不适用

彩图 8　大自然的四种基本相互作用及其性质

TURING 图灵新知

希格斯粒子是如何找到的？



来自史上最大物理实验的内部故事

[英] 乔恩 · 巴特沃思 / 著　黄日俊 / 译

Smashing Physics

人 民 邮 电 出 版 社

北　京

图书在版编目（C I P）数据

希格斯粒子是如何找到的？ ：来自史上最大物理实验的内部故事 / （英）巴特沃思著 ；黄日俊译. -- 北京：人民邮电出版社，2016.1
（图灵新知）
ISBN 978-7-115-40546-3

Ⅰ. ①希… Ⅱ. ①巴… ②黄… Ⅲ. ①强子－对撞机－普及读物 Ⅳ. ①O572.21-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第232151号

内 容 提 要

在这本首次由内部人士讲述希格斯玻色子发现过程的书中，CERN资深物理学家乔恩·巴特沃思将带你深入体验发现的整个过程，了解人类有史以来建造的最大最复杂的实验设施——大型强子对撞机（LHC）——背后的科学、技术、政治和文化，并感受现代粒子物理大型国际合作项目中的生活点滴。

◆ 著 [英] 乔恩 · 巴特沃思
译 黄日俊
责任编辑 楼伟珊
责任印制 杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 http://www.ptpress.com.cn
北京 印刷

◆ 开本：880×1230 1/32
印张：9 彩插：2
字数：222千字 2016年1月第1版
印数：1－5 000册 2016年1月北京第1次印刷
著作权合同登记号 图字：01-2014-6524号

定价：39.00元
读者服务热线：(010)51095186转600 印装质量热线：(010)81055316
反盗版热线：(010)81055315
广告经营许可证：京崇工商广字第0021号

版 权 声 明

献给苏珊娜、利昂、费利克斯以及伊迪

推荐序

2012 年 7 月 4 日必定成为人类科学史上一个重要的日子。这一天，两个开展大型强子对撞机（LHC）物理研究的重要国际合作实验组 ATLAS 和 CMS，在 LHC 运行三年后同时宣布在各自的探测器上均发现了物理学家，乃至全人类期盼已久的所谓“上帝粒子”——希格斯粒子存在的迹象。

LHC 及其配套的六个探测器由八十多个国家的近万名科学家，历时二十年，花费逾百亿美元于 2008 年在日内瓦的欧洲核子研究中心（CERN）建成并试运行，次年开始正式运行。CERN 是国际著名的粒子物理、核物理研究机构，始建于上世纪五十年代，地处瑞士与法国交界的日内瓦乡村。几十年来，CERN 建造了包括著名的大型正负电子对撞机（LEP）在内的若干不同类型的粒子物理、核物理实验装置，产生过多项具有里程碑意义的重大科学研究成果，甚至现在风靡全球、人们日常生活不可或缺的万维网（WWW）也发端于 CERN 的实验室。当年它只是科学家为了数据传输和交流方便而发明的一项辅助工具而已，足见这个研究机构对科学发展和社会进步产生的影响之大。

LHC 是 CERN 目前正在运行和最为重要的实验装置，其主要科学目标包括精确检验粒子物理的标准模型、发现标准模型的最后一块基石——希格斯粒子，以及寻找超出标准模型的新物理信号等。为了避

免实验受到外界因素的干扰，同时也为了尽可能地减少对环境造成不良的影响，周长 27 公里的 LHC 建在 CERN 地下近百米深处。它是有史以来人类建造的最庞大、最复杂的科学装置，也是迄今为止能量最高的对撞机。这台庞然大物将两团质子相向加速到光速的 99.999 999 1%后使它们对撞，其能量足以再现大约 137 亿年前宇宙诞生之初万亿分之一秒的高密高热状态。LHC 运行所消耗的电量大致相当于一个中等城市的用电量，其能量之大由此可见一斑。

LHC 高能质子–质子对撞实验装有四个大型探测器，ATLAS 和 CMS 就是其中的两个多功能探测器，它们也分别是相应实验合作组的名称。这两个重达万吨左右、有六七层楼高的巨型探测器通过探测质子–质子碰撞碎裂后的次级产物检验各种理论模型给出的预言，例如标准模型中的希格斯粒子及其性质，并寻找新的实验现象。这两个合作组分别有数千名来自世界各国的科学家在开展合作研究。这样规模的科学实验本身就是一个科技奇迹。试想，近万名科学家组织起来，用如此巨型的实验装置，研究尺寸只有 10^{-13} 厘米、重量仅 10^{-24} 克的质子碰撞，这难道还不够神奇吗？！

粒子物理中的所谓“标准模型”是由温伯格（S. Weinberg）、萨拉姆（A. Salam）和格拉肖（S. L. Glashow）于上世纪六十年代完成的，可以说是目前人类对微观世界认识方面的最高理论成就。几十年来大量的高能物理实验表明，标准模型是描述 TeV 能标以下基本粒子及其相互作用（引力除外）规律的正确理论，模型的创立者也因此获得了诺贝尔物理学奖。标准模型虽然由温伯格、萨拉姆和格拉肖最终完成，但实际上在其建立的过程中，许许多多科学家锱铢累积的研究铺垫也是必要的。这其中，有些成果非常重要，是标准模型建立不可或缺的，譬如杨–米尔斯理论、对称性自发破缺和希格斯机制等。

希格斯机制的建立过程也几经波折，最终由布劳特（R. Brout）、恩格勒特（F. Englert）和希格斯（P. Higgs）于上世纪六十年代初完成。

通过希格斯场和希格斯机制，原本没有质量的基本粒子在宇宙冷却的过程中获得了质量；希格斯场也通过自相互作用获得了质量，对应的粒子即是标量希格斯粒子。

标准模型是如此成功，建立半个多世纪以来经历了各种检验，均没有遇到什么严重的挑战。在此过程中，模型所预言的各种现象不断被证实，模型所需的基本组员也陆续被发现。2012 年前，唯一的缺憾就是希格斯粒子还未找到，尽管多数粒子物理学家都认为，它一定存在，存在于某个尚未被探寻的角落。发现希格斯粒子对于标准模型的确立、粒子理论的进一步发展、宇宙学研究等许多方面都有深刻影响，这就是为什么在五十多年前希格斯粒子被预言后，高能物理学家屡挫屡进、孜孜以求的原因；是为什么 2012 年在 LHC 实验上发现希格斯粒子的迹象后物理学家欢呼雀跃、科学界迅即将其确立为当年最重要的科学发现的原因；也是为什么次年诺贝尔物理学奖就授予希格斯机制的提出者希格斯和恩格勒特的原因。（遗憾的是，另一位希格斯机制的奠基人，布劳特博士没能等到五十年后他的预言被证实的历史性时刻。）这也再次提醒我们，科学理论是对自然的解释和描述，正确与否最终要靠实验来检验。如果得不到实验检验，再漂亮的理论，不论它看起来是多么玄妙，也不过是个假说，不会有长久的生命力。

《希格斯粒子是如何找到的？》一书的作者是伦敦大学学院（UCL）物理和天文系主任、CERN 资深物理学家乔恩·巴特沃思（J. Butterworth）教授。自 2008 年 LHC 开始运行伊始，他便带领 UCL 团队在 ATLAS 实验组开展研究。他是一线科学家，是在希格斯粒子发现过程中做出了实质性贡献的亲历者，对“上帝粒子”的发现过程有切身体会，故事讲述出来真实、可信、入木三分。在书中，巴特沃思教授向读者介绍了 LHC 及 ATLAS 探测器、粒子物理标准模型和希格斯粒子，以及 LHC 实验中众多物理学家是如何孜孜不倦地工作的，包括其中的欢笑和泪水。你可以把这本书看作是希格斯粒子发现的回忆

录，也可以视为巴特沃思教授那段工作岁月的记事簿，还可以把它当作介绍粒子物理的科普书。从字里行间读者可以感受到巴特沃思教授对粒子物理的满腔热情，等待实验结果出现时的激动和焦虑，给我们讲述基本概念时的耐心和期望，探讨问题时的严谨、缜密和忘我般地直抒胸臆，以及由于实验结果不理想而表现出沮丧等科学家的真性情。本书语言通俗而严谨，通过带领读者“游览”CERN、“观察”探测器内部结构、“参加”世界各地的大小会议等方式，讲解粒子物理的基本知识和当今高能物理实验的研究现状，走进一位粒子物理学家的生活，和他一起感受 LHC 的魅力，理解和探索粒子物理之美。

阅读本书就像看电影一般。影片中“镜头”时远时近，场景不断切换，捕捉那些在 LHC 上发现希格斯粒子过程中台前幕后的有趣事件。它的“取景地”遍及世界，从瑞士日内瓦到印度孟买，再到美国芝加哥，甚至还有南极大陆！影片中既有严肃高端的国际高能物理大会，有英国财政部外科学家们的抗议示威，也有汉堡莱泊帮（Reeperbahn）酒吧中一群醉醺醺的物理学家跳舞的画面，栩栩如生，引人入胜。不管我怎么说，用句老话，要想知道个中滋味，读者还得亲自品尝（鉴赏）。

本书的一大特色是分布于各章节末尾的“术语”，它们是粒子物理的重要概念。巴特沃思教授非常擅长用类比的手法向读者解释专业知识，如行云流水般娓娓道来，让人有一种读着读着豁然开朗的感觉。另外值得一提的是，黄日俊博士的翻译紧跟时代发展，用词很时尚，诸如“三蹦子”、“祖祖师爷”、“直男”、“老大”等，译得恰到好处，读来让人忍俊不禁。他本人是理论物理科班出身，不仅对物理内容的理解很到位，语言文字功夫也相当出色，我认为这是一部优秀的科普译著，相信广大科学爱好者通过阅读本书能够增长知识，得到乐趣。

乔从丰

中国科学院大学物理科学学院

目　　录

科学是如此一门学科，在其中，即使是此辈之愚者亦能超越上辈之智者。

——马克斯·格卢克曼（Max Gluckman）

引　　言

瑞士日内瓦的梅兰乡间有一家土耳其烤肉店，烤肉店附带有十几张台球桌。2012 年 7 月初，我与英国《第四台新闻》（Channel 4 News）栏目的科学记者汤姆·克拉克（Tom Clarke）在那里边玩台球，边向他以及他的观众解释大型强子对撞机最新发现的重大意义。

上句话包含的信息至今仍令我热血沸腾——大发现，以及巨大的公众关注度：汤姆和众多记者特意安排出一天时间，过来和许多物理学家对话。他的报道成为了 7 月 4 日当天新闻的头条。

7 月 4 日我们宣布的大发现是物理学迈出的巨大一步；而对于支持着文明发展的科学而言，此次巨大的公众关注度是一个重要的里程碑，象征着公众与科学之间持续增长的互动达到了一个新的高度。我强调的是科学，不仅仅包括技术，还包括科学的过程——在多大程度上它可以自我调控，以及什么构成了科学绝对真理（很少！）和科学知识（很多！）。

我特意提到梅兰，是因为欧洲的粒子物理实验室 CERN 离此地只有五分钟路程。梅兰小镇风景如画，但我和汤姆所在的梅兰城区到处都是公寓大楼，很可能将和世界上的其他许多地方一样，成为充满了涂鸦和难闻气味的钢筋水泥丛林。不过，由于这里是瑞士（差一点就

不是了——约一百米之外就是法国），所以它是一尘不染而又井然有序的钢筋水泥丛林。工作于 CERN 的许多科学家也住在此地。

我任职于伦敦大学学院（University College London，UCL），但和全世界许多粒子物理学家一样，大部分时间我在 CERN 从事研究。UCL 临时公寓就在梅兰，所以我和我的同事经常在那里生活。特别是，在 2010 年 10 月到 2012 年 10 月间（即我们获得首批高能实验数据的那段时期），我在 CERN 的 ATLAS 实验中主持一个工作组。所以那时候，我几乎每周都会去梅兰。

这本书不是物理教科书，不是希格斯玻色子大发现的回忆录，不是日记，不是鼓动公众与科学家进一步互动的宣言，虽然它也确实包含了以上全部元素。你将从中了解粒子物理和粒子物理学家的生活、科学发挥作用（以及偶尔不发挥作用）的方式、科研如何谋求自己的生存和繁荣，以及牵涉其中的许多人，此外还有大量我的主观看法。我希望这些也能够解释为什么汤姆·克拉克和全球许多媒体会在那个 7 月造访梅兰。

但在那之前，我需要向你介绍很多互相关联的信息，其中很多或许并不常见。有些信息在它们首次出现之时可能看起来和其他信息没有什么关联，就好像拼图玩具中孤立的一块，但随着你在阅读本书的过程中收集到的信息越来越多，它们将彼此强化，并最终呈现出完整的图景。如果我称职的话，你将在阅读故事、收集信息的过程中体会到乐趣，并因此而感到激动。乐趣和激动的情绪是盘旋于我记忆中的两个主要印象，而带给我如此美妙体验的就是人类有史以来最大的科学仪器：大型强子对撞机！

第一章

数据到来之前

1.1 为何如此庞大？

在瑞士、法国边境地下百米深处暗藏着一条环形隧道（彩图 1）。隧道全长 27 千米，里面藏着个庞然大物。它就是我们的主角：大型强子对撞机（Large Hadron Collider，LHC）（彩图 2）。如果你熟悉伦敦，我可以告诉你，27 千米约等于伦敦地铁环线的总长，而隧道大小与伦敦地铁北线相似。要是你还一脸茫然，试试下面的。

让我们来场想像之旅！想像着你正处于瑞法边境的日内瓦国际机场附近，驱车从梅兰（Meyrin）出发，驶向法国乡间。前方是侏罗山脉徐徐而来，后方是日内瓦机场缓缓而去。穿过边境时，你同时也经过了欧洲核子研究中心（Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire，CERN）主楼，它就在左手边。如果看向右手边，你会发现一座巨型木制球形建筑，看起来像是环保的核反应堆（当然它并非核反应堆，而是展览馆，不过显然很环保）。或许在眼角余光处你还会瞥见超环面仪器（A Toroidal LHC Apparatus，ATLAS）探测器控制室所在大楼。如果瞥见了，你定会一眼认出：它的外墙上覆盖着巨大的 ATLAS 探

测器壁画（彩图 3），十分惹眼。

尽管壁画非常壮观，它仍然只有实物大小的三分之一（彩图 4）。ATLAS 探测器非常庞大，它深藏地底，位于 LHC 的一个对撞点上。这些对撞点，顾名思义，就是身怀全球最高能量的两道粒子束对撞之处。ATLAS 探测器身为两个通用型粒子探测器之一，负责粒子束对撞结果的测量任务。

继续驱车前进。若想让旅行更加有趣，可以想像自己正端坐在一辆白色老爷小货车中，车身印着醒目的 CERN 标志。

沿着风光秀丽的侏罗山脉山麓，穿过圣热尼普伊（Saint-Genis-Pouilly）小镇，继续深入热克斯地区（Pays de Gex）。一路下来你都在 LHC 的包围之中。如果你是想像时值冬日，那么你可能会望见前方远处克罗泽（Crozet）的滑雪缆车徐徐上升。那可是侏罗山脉的一处滑雪胜地。（著名的勃朗峰就在背后地平线上，但是别分心，盯紧前方道路。）别停留，继续深入热克斯地区，途中穿过普雷格宁（Pregnin）、维拉斯（Véraz）和布雷蒂尼（Brétigny）。经过约 25 分钟的法国边境小镇自驾车之旅（小心别被堵在拖拉机后面，否则就慢了），你就到达了热克斯附近的塞西（Cessy）小镇。此时你会发现自己正处于一条通道上端，通道往下直达紧凑渺子线圈（Compact Muon Solenoid，CMS）探测器，它是 LHC 中另一庞大的通用型粒子探测器。ATLAS 和 CMS 分别由两组相互独立的物理学家设计制造，它们原理各异，互为竞争对手。但殊途同归，它们都有一个共同的使命：尽其所能精确地测量 LHC 中质子对撞产生的粒子。之所以设计两个独立的探测器，就在于既能让它们相互验证，又能让它们正面交锋，多快好省地获得实验结果。

从 ATLAS 到 CMS 一路下来，你都置身于全球最大规模的物理实验中。从瑞法边境的 ATLAS 控制室主楼开始，你就闯进了这个庞然

大物的地盘，而现在你已经横穿它的直径。

LHC 的使命是对撞粒子。不仅如此，它的雄心是让亚原子粒子以有史以来加速器所能达到的最高能量对撞。物理学家试图通过粒子对撞来研究宇宙在极小距离上的结构，而极小距离对应着极高能量（后文会加以解释）。实验对象微乎其微，实验仪器却硕大无朋，简直令人匪夷所思！挖一条长龙般的隧道所费不赀，为什么不造得小一些呢？

这是因为隧道长度决定了粒子束对撞能量的大小！如果你知道研究越小物体反而需要越高能量（如果不知道，至少现在先假装知道），那么只要从日常生活中的物理现象出发，你就不难明白为什么 LHC 需要如此庞大了。

在不受外力的情况下，运动着的粒子将保持匀速直线运动状态。这是牛顿第一运动定律的体现。在日常生活中这并非一目了然（牛顿以敏锐的洞察力将其总结了出来），但一旦想通了，你就会发现它无处不在。

牛顿第一运动定律之所以在日常生活中并非一目了然，是因为地球上所有运动着的物体都受到摩擦力和空气阻力，而且所有物体都受万有引力控制。比如，滚动的球最终会停下来，因为摩擦力和空气阻力消磨了它前进的动力；扔到空中的球最终会落回地面，因为地球引力阻止了它的逃离。

如果摩擦力或引力小到可以忽略不计，情况就比较了然了。又比如，一辆飞驰的汽车（或者还说那辆 CERN 的老爷小货车）若要减速，需要司机脚踩刹车施加一个额外阻力。再举一个和 LHC 更相关的现象：飞驰的汽车若要转弯，轮胎与路面之间的摩擦力必须足够大，否则车子将会打滑。

急转弯时，司机和乘客都会感受到“惯性力”。小货车在转弯，你的身体却试图保持直线运动，所以你会感觉到小货车的一面挤压着你。

从物理的角度理解，你可以认为小货车的一面推着你，改变你的运动方向，强迫你和车子一起转弯。

在物理中，速率和运动方向构成速度。而速度和物体（例如小货车或乘客）的质量构成动量。速度或质量越大，动量也越大。而唯有施加外力，动量才会改变。

关于速度和质量如何具体“构成”动量，我故意说得模棱两可。当速度远小于光速时，“构成”可以近似理解为“相乘得到”——速度和质量相乘得到动量，这是中学物理教科书的标准答案。然而，这并非正确答案。低速运动时，两者只有微小区别，可以忽略不计。但随着速度趋近光速，区别将越来越明显。那时牛顿力学将力不从心，你需要爱因斯坦和他的相对论（详情后述）。当然对于小货车，牛顿力学绰绰有余。

另外，动量的改变越大，要施加的外力也越大。譬如大卡车的刹车制动性能必须要比小货车的更强。由于大卡车更重，所以即使两者以相同速度运动，让大卡车停止而需要改变的动量也越大，因此需要施加更大阻力。

这些常识也可以引申到 LHC 中，因为隧道中疾驰的质子面临着相似的情况。它们是迄今为止在实验室中加速得到的能量最高、动量最大的亚原子粒子。虽然质子的质量微乎其微，它们的速度却极高，所以总是顽固地沿直线前进。为了迫使两束质子在环形对撞机中转弯以便最终对撞，我们就需要对之施加巨大的外力。而施加这种外力的是人类以倾国之力制造的最强弯曲磁铁。

如果最大外力是确定的，我们就需要在加速器能拥有多陡的弯道和质子能得到多大动量之间作出权衡。仍借用小货车的比喻：飞驰的汽车若要转弯而不打滑，车速必须低于某个最高值。弯道越陡，转弯时车速就必须越小，而弯道平缓时则可以开得快些。LHC 设计得如此

庞大，亦是同理。圆环越大，曲率越小，所以大圆环的弯道比小圆环的平缓，在其中疾驰的质子能够在转弯而不“打滑”的前提下获得更大动量。对质子而言，“打滑”意味着“冲出对撞机，将造价昂贵的磁铁或探测器汽化毁坏,酿造灾难性后果”。这种情况当然绝对禁止发生。

由于磁铁能够施加的最大外力是确定的，所以为了让质子获得更高能量，加速器必须设计得非常庞大。不过，如果对撞粒子是电子，这种设计另有值得一提的原因。

LHC 并非瑞法边境地底隧道的第一主人。在它之前，另一庞然大物占据着这条 27 千米长的隧道，名为大型正负电子对撞机（Large Electron-Positron Collider，LEP）。（正电子是电子的反粒子，带一个正电荷，有别于电子带一个负电荷。LEP 使正电子和电子对撞。说句题外话，偶尔有一些家长责备粒子物理学家发明一些故弄玄虚的名字忽悠自己的孩子,可惜此处提及的都是描述性的、甚至有些无趣的名字。）由于已经探索了力所能及的大部分物理，而且也无法再提高能量了，鸟尽弓藏，LEP 终于在 2000 年关门大吉。和质子一样，正负电子之所以无法获得更高能量，也和隧道大小有关，只是原理各异。

这种差异与电子的静止质量比质子的约小 1800 倍有关。然而，静止质量的差别并不会影响施加外力的大小，因为当电子和质子接近光速运动时，需要用相对论公式计算它们的动量，而计算结果表明，改变动量所需的外力大小与粒子的静止质量无关。因此，当电子和质子处于最高能量时，让它们转弯需施加的外力大小没有多少区别，外力并非问题所在。

罪魁祸首其实是同步辐射，它是带电粒子在加速运动时辐射的能量。同步辐射可以近似类比于快艇冲风破浪时激发的波浪，普遍存在于各种现象中。在对撞机中，带电粒子绕过弯道时加速运动并辐射光子，而光子将带走部分能量。

粒子质量越小，辐射效应越严重。辐射能与粒子质量密切相关：它与质量的四次方成反比。由于质子的质量是电子的 1800 倍，所以相同情况下电子转弯时损失的能量是质子的 1800×1800×1800×1800 倍，也就是约 11 万亿倍！

在 LEP 中，正负电子持续绕着弯道飞驰，能量以光子的形式辐射出去。每经过一圈，就必须给正负电子束补充损失掉的能量。对撞机环道里间隔设置着许多金属结构的共振腔，而束缚在共振腔内的高频电磁波将为正负电子束补充能量。在共振腔中，电场和磁场精确地随着电子团的进出而简谐振荡，每当电子团到达共振腔，电磁场都会给它们加上把劲。这种补充能量的过程在任何相似功能的机器上都存在。但对某些粒子而言，当它们被加速到一定能量后，同步辐射损失的能量已经无法由共振腔中的电磁波完全补充，这就是能达到的最高对撞能量。LEP 恰恰触到了这个天花板。

在这里，隧道的大小再次变得重要。总长 27 千米的环形隧道拥有很平缓的曲率。隧道越小，曲率越大，粒子的加速度也越大，同步辐射损失的能量也会越多，最高对撞能量就会降低。LEP 如此庞大，正是此理。

说句题外话，同步辐射在其他一些领域中却是宝贝。譬如位于牛津郡哈韦尔的钻石光源同步加速器就是专门为了同步辐射而建造的。辐射产生的光子射线可以用于原子、晶体、分子、材料以及表面物理的研究。随着更高能量加速器的兴建，许多原本致力于粒子物理研究的机器和实验室都失去了用武之地，转行做了辐射光源，服务于其他领域。事实上，它们的转行还成就了我的良缘，令我心怀感激。许多年前，我还在汉堡的德国电子加速器研究所（Deutsches Elektronen-Synchrotron，DESY）攻读博士学位。那里的粒子物理学家正醉心于强子–电子环形加速器（Hadron-Electron Ring Accelerator，

HERA）的研究，而我工作于其中的 ZEUS 探测器合作组。那时我的女朋友苏珊娜正在攻读晶体学博士学位，需要利用同步光源探索蛋白质等物质的内部结构。鉴于粒子物理加速器和同步光源存在着类似共生的关系，欧洲分子生物学实验室在 DESY 也有一个分支。在一次观看圣保利队比赛时，苏珊娜和她的博士生导师在拥挤的人群中进行了激烈的讨论，终于说服她的导师，同意让她大部分时间在汉堡从事博士研究工作。现在我们结婚快 20 年了，一直伉俪情深。言归正传，若要获得高能电子束，同步辐射仍是心头之患。

因此，LEP 在 2000 年关闭拆除，取而代之的是 LHC 的兴造。由于质子的同步辐射能比电子的小 11 万亿倍，所以 LHC 能够获得更高能量。但若想获得更大动量，还需要制造更强大的弯曲磁铁。

1997 年 7 月 1 日，时任 CERN 所长的克里斯·卢埃林·史密斯（Chris Llewellyn Smith）[①]公布了 ATLAS 和 CMS 探测器的正式建造许可。

LEP 表现很好，但质子给了物理学家更多期待！

术语　　标准模型中的粒子和作用力

如果你只想一目十行地读完这本书，不介意陌生奇怪的名词，你完全可以跳过“术语”部分。但如果不了解标准模型的一鳞半爪，恐怕有些段落会不知所云。

试问：“一尺之棰，日取其半，是否万世不竭？”对于这个古老的问题，粒子物理的标准模型给出了一种解答，而且它是目前已知的最佳解答。

让我们再来一场想像之旅，这回往微观世界。想像一下，随手拿个物体，例如石头、一把空气、这本书或你的脑袋，将它剥洋葱般层

① 巧合的是，之前他任职牛津大学物理系主任，之后任职伦敦大学学院校长，似乎在一段时期内紧跟着我，做我的顶头上司。

层剥开。你将发现从宏观到微观，它呈现着奇妙的层次结构，一直小到微米、纳米尺度的小颗粒：纤维、细胞、线粒体，等等。

继续剥开这些小颗粒，最终你将得到分子。如果能量足够大，还可以剥开分子，得到原子。原子由原子核和电子组成。原子核非常小，结构坚硬致密，稳坐正中央，而电子如云雾般环绕着原子核。

你需要非常高的能量，才能从原子核的电磁吸引力中夺走电子。如果拥有更高的能量，你甚至可以剥开原子核，得到质子和中子。然而这仍非终点，如果你有能力继续提高能量（求助于大型对撞机吧！），还可以剥开质子和中子，得到夸克（quark）。

迄今为止，人类还无法剥开夸克，也没有发现夸克的任何内部结构。日取其半，已经无物可取了。

在“粉碎原子”时，我们得到了原子核和电子。如果先把原子核放在一边，而尝试剥开电子，我们将会早些碰壁，无物可取。迄今为止，人类还无法剥开电子，也没有发现电子的任何内部结构。这种现象（无法继续剥开粒子）就是判断粒子是否属于“基本粒子”的标准。

无论从什么物体开始，无论它是什么材料，只要不断提高能量，层层剥开，最终它都会“粉碎”成夸克和电子，无一例外。在标准模型中，夸克和电子构成了世界万物，而它们本身不由任何东西构成。

如果坚持阅读下去，你会遇见为数众多、名称各异的粒子。但记住，万变不离其宗，如果剥开它们，只会得到少数几种基本粒子（彩图 7）。

电子属于轻子（lepton），轻子是一类基本粒子的总称。μ 子（muon，读作渺子）和 τ 子（tau，读作陶子）也属于轻子，它们和电子相似，但质量更大。除此之外，轻子还包括三种中微子。中微子特立独行，几乎不和任何物质相互作用，但它们比比皆是，不可胜数。太阳就是一个巨大的中微子源，每秒钟约有一千万亿个来自太阳的中微子从你的身体穿越而过！

夸克组成了另一类基本粒子。正如轻子有六个成员，夸克也有六种，分别为上夸克（up）、下夸克（down）、奇异夸克（strange）、粲夸克（charm）、底夸克（bottom）和顶夸克（top），质量依次递增（但名字古怪程度中间最高）。

上、下夸克组成了质子和中子。夸克总是禁闭在比它们更大的粒子中，人类从来没有发现自由夸克。由夸克组成的更大粒子通常称作强子（hadron，所以有大型“强子”对撞机，它主要用来对撞质子，偶尔也会用来对撞含有质子和中子的原子核）。

我已经介绍完目前已知的所有物质粒子。每一种粒子都有各自对应的反粒子，并且它们通过作用力相互作用——吸引、排斥或者散射（彩图 8）。粒子之间的作用力不能凭空产生，需要由介质传递，而另一类粒子，矢量玻色子（vector boson），扮演着介质的角色。

电磁相互作用（电磁力）由光子（photon，光的量子）传递，作用于带电粒子，即中微子以外的所有粒子。

强相互作用（强力）由胶子（gluon）传递，作用于夸克。

弱相互作用（弱力）由 W 和 Z 玻色子传递，作用于所有粒子。

标准模型若要真正发挥作用，尤其是让基本粒子获得质量，就必须引进另一种全新的粒子——希格斯玻色子（Higgs boson）。寻找希格斯玻色子，毋庸置疑，是本书的主要内容，稍后我会细细道来。

或许你已经注意到，怎么一直不见提起我们最熟悉的引力？不幸的是，目前的标准模型中还没有引力的一席之地。引力由爱因斯坦的广义相对论描述，而迄今为止物理学家对广义相对论的量子化仍然束手无策。

现在你已经见过了宇宙大舞台的所有演员。虽然物理学仍有许多未解之谜，但令人称奇的是，大到不可思议的宇宙，小到难以想像的基本粒子，不胜枚举的数据（主要来自物理学、化学和生物学）都能

够被描述和预测，精确到叹为观止的地步，而需要的仅仅是一些基本元素：夸克、轻子、四种基本作用力，再加上希格斯玻色子。

1.2 “稳赚不赔”定理

大约在 2001 年，我开始认真参与到 LHC 的工作中。在那之后九年，我们才在 LHC 上完成高能粒子束的首次对撞。看起来我算是前辈了，但无论你相信与否，对于整个实验而言，实际上我已经姗姗来迟了。当开始设计那条 27 千米长的隧道、准备建造 LEP 时，物理学家就已经考虑了强子对撞机的可能性，并且在 1984 年发布的 LEP 设计报告中有提及。那时我刚从初中毕业，准备进入预科学校。直到 1997 年，LHC 才获得建造许可，期间经过了科学、技术、经济和政治的漫长论证，继之以研发、模拟以及更多的政治，可谓来之不易。

1997 年，我刚从德国汉堡搬到英国伦敦，仍然沉浸在 HERA 的工作中。这就是大型合作项目的一个特点，你在其中待得越久，经验和专业知识积累越多，你对团队的责任也越大，就越难离开团队。而如果决定参加新项目，无论是它令人困惑的软件、硬件还是不熟悉的物理都会令你望而却步。所以若想开始新的研究，有时候需要一点契机。

出乎意料的是，我们第一个孩子的出生竟然成了我的一点契机。孩子的出生已经成了必须优先考虑的事情，所以我推掉了在 ZEUS 合作组中担任的所有管理和技术职务。照顾怀孕的苏珊娜以及在孩子出生之后尽到做父亲的责任已经令我抓耳挠腮，分身乏术，因此我不想让任何职务与之发生冲突。

幸运的是，一切顺利，皆大欢喜。作为额外收获，我也有了大量自由时间思考物理。那时候 CERN 正在筹建 LHC，而我也一直想尽可能多地阅读思考一些在 LHC 中将会用到的物理，给大脑充充电，只是

苦于找不到时间。从 HERA 实验狂热症中逃离的这个假期恰好给我提供了这样的机会。几个一同为 HERA 工作的朋友（物理学家杰夫和布赖恩[①]）和我在一起，我们一直在思考可能的研究项目——最激动人心、最值得研究的课题究竟是什么？由于我们都拥有 HERA 的工作背景，而那里的理念就是精确测量，在潜移默化之下，我们都对“超出标准模型”的新物理持怀疑态度，不屑于替那些我们认为没有什么可信度的猜想寻找存在证据，只热衷于测量真实发生的物理过程。不过老实说，LEP 的理念也是精确测量，所以可能 HERA 的工作背景也没有让我们变得特别与众不同。

言归正传。我们不仅不相信超对称（supersymmetry）、大额外维（large extra dimension）、人工色（Technicolor）等为了解决标准模型自身存在的问题而将其扩充的理论，甚至也不相信希格斯玻色子——虽然它在标准模型中不可或缺，但它从未经过实验证实。所以我们反问自己：“假如不存在新物理，退而言之，现有理论中什么物理过程最重要、最有趣、最值得花心思去测量呢？”也许这是悲观主义者的思考方式，但仍然很有趣。

我们的最终思考结果[②]是矢量玻色子散射。根据理论预测，这种散射过程偶尔会在非常高的能量对撞中出现，十分罕见。对它的观测也符合所谓 LHC 的“稳赚不赔”（No Lose）定理。矢量玻色子散射可以解释为什么希格斯玻色子在标准模型中如此重要，所以对我们而言，在 LHC 这块大蛋糕中，它确实是值得第一口咬下的地方，而且应当立即付诸行动。

矢量玻色子是传递作用力的介质。光子就是矢量玻色子，它是传

---

① 杰夫·福肖（Jeff Forshaw）和布赖恩·考克斯（Brain Cox），后者在工作之余也撰写物理科普书，不过还没有写到我们现在这个主题。

② 当然参考了一些文献——我这里并非声称我们是第一个思考这些事情的人！

递电磁力的介质。更引人注意的矢量玻色子其实是 W 玻色子，以及在某种程度上，Z 玻色子。它们传递弱力，并有一个奇怪性质：和光子不同，它们拥有质量。

在 LHC 中两束质子对撞时，设想两个分别来自每束质子的夸克急速相向飞驰，最终对撞。有很小但非零的概率，它们会分别辐射一个 W 玻色子。有更小但依旧非零的概率，W 玻色子会相互对撞。这就是矢量玻色子散射——此处即 WW 散射。同理，Z 玻色子或光子也会发生这种散射。散射的方式多种多样：或者以各种方式碰撞弹开，或者两者先粘合再分裂。根据量子力学原理，所有可能发生的散射方式出现的概率都要加以综合考虑[①]——或者相加，或者相减。将所有计算结果叠加，就得到 WW 散射过程的总概率。

“稳赚不赔”定理就来源于这种计算。在一些散射方式中包含希格斯玻色子，但当时还没有关于这个怪物存在的直接证据。如果假设不存在希格斯玻色子，将包含希格斯玻色子的散射方式排除，再把其他散射方式出现的概率叠加，那么随着对撞能量越来越高，WW 散射过程的总概率也会越来越大。[②]如果持续提高能量，总概率将大于一，甚至直到无穷大。这当然毫无意义，意味着理论已经失效，因为真实世界不存在无穷大的结果。但它还有更深刻的含义：要么在 LHC 中将会发现希格斯玻色子，要么存在现有理论之外的新物理。

在悲观主义者的剧本里，既不存在希格斯玻色子，也不存在黑洞，总之不存在任何猜想，所以若想搞清楚究竟发生了什么，唯一（或者说最合适）的线索就是测量 WW 散射。要么存在希格斯玻色子，要么

① 其中还要考虑到各种时序，而不只是我这里给出的“夸克辐射 W 玻色子然后它们对撞”。

② 由于包含希格斯粒子的散射方式出现的概率含有负号，所以它们的出现将抵消总概率的增长。

存在某些全新的东西，总之必定存在着什么——简直就是“稳赚不赔”的买卖！通过矢量玻色子散射的研究，必定能发现一些有趣的物理。

然而，说起来容易做起来难。测量 WW 散射并非易事，我们面临着许多有趣的挑战。当时曼彻斯特大学和苹果公司做了一笔交易，添置了一个新的苹果电脑服务器农场。这些电脑安装了新近发布的 Unix 操作系统（OS X），给我们帮了大忙（虽说比其他人用的运行 Linux 系统的电脑要贵上许多）。回想起来，真是一段温馨的时光。那时我的儿子还未出生，但我已经推掉了大部分职务，所以有足够时间，每天待在萨德尔沃思（Saddleworth）的公寓中，噼噼啪啪地往服务器农场的电脑里输入模拟程序，检验我们的想法。一直工作到晚饭时分，匆匆穿过小巷，找个酒吧，喝喝啤酒，享受晚餐，继续激烈争论新的想法。我们的论文在 2002 年 1 月发表，刚开始的六年里它几乎无人问津，但之后就迅速流行起来了。这是我人生中的一个骄傲。事实证明，论文中的一个想法不仅用途广泛，而且在寻找希格斯粒子中扮演着主要角色。

1.3 人们将会对此感兴趣

当 CERN 乃至遍布全球的研究机构正如火如荼地筹建 LHC 和探测器时，可以明显感受到，出于各种各样的原因，越来越多的人将对这个项目感兴趣。毋庸置疑，工程和科学是引人注目的两个原因。而无与伦比的规模，包括所费不赀的预算，也令其备受瞩目。项目所牵扯的国际合作以及数以千计的物理学家相互协作所涉及的社会学也引发了许多人的兴趣，包括来自社会科学的学者。当然，两三个认为或者声称认为物理学家将毁灭瑞士、全世界甚至全宇宙的人到处发表耸人听闻的言论，也有意无意地扩大了我们的知名度。

还有一群人，诈骗者和阴谋论者，“基于平衡报道原则”[①]，也占据着大量媒体阵地。对付他们的唯一方法就是向人们提供正确的资讯。另外，欧洲的纳税者每年为 CERN 提供了相当于十亿欧元的经费，所以我们有义务向他们解释为什么需要这么多钱，以及它们都用来做了什么。

我想，类似想法一定存在于许多参加这个项目的人心中，其中当然也包括 CERN 媒体公关部主管詹姆斯·吉利斯（James Gillies）以及众多优秀的科学记者。这些想法也促使我们在 2008 年机器启动的那天敞开 CERN 的大门，邀请全世界的媒体和我们一起度过所谓“大爆炸日”。

这些想法同样促使我参与到小型系列纪录片《对撞的粒子》（*Colliding Particles*）的摄制中。项目在 2008 年夏天启动，以旁观记录的方式进行。麦克·佩特森（Mike Paterson）身兼摄像师、制片人、采访者和导演——事实上，除了动画师以及偶尔的录音师，他都包了。专门资助粒子物理研究的英国科学和技术设施理事会（Science and Technology Facilities Council，STFC）给他提供了一笔制作经费。纪录片的目标群体是学校，尤其针对当时推广的一门课程，介绍如何进行科学研究。很明显，人们期待摄像机后面的物理学家可以让学生明白科学研究是怎么一回事。

纪录片制作进展相当顺利。麦克有一种天赋，能够将我漫长不连贯的镜头剪辑出令人惊讶的效果，使我看起来条理清晰、逻辑严密。在第一集中，大概有五分钟的镜头，我讲得每一句话几乎都不完整。但麦克在我的背景处轮番放映出 LHC 和正在组装的 ATLAS 探测器画面，给观众带来一种我富有洞察力和智慧的印象。至少，我母亲和我

① 引用戴维·希夫曼（David Shiffman）一篇文章的标题：“多位世界顶尖专家指出在环境新闻报道中存在伪平衡报道问题，但史蒂夫表示不同意。”

看过之后留下了这种印象。这部纪录片还邀请了亚当·戴维森（Adam Davison）以及加万·萨拉姆（Gavin Salam），前者曾经是我的博士生，之后又随我做博士后，后者是巴黎的一个理论物理学家。纪录片的内容（至少前几集）取材于加万的学生马蒂厄·鲁宾（Mathieu Rubin）和我在 2007 年合作的一篇论文。

我之所以提起这些事情是为了表明，除了某些非常保守的粒子物理学家，我们都很认真地参与到公众事件中。这部纪录片的制作是粒子物理中史无前例的事件，跻身当时粒子物理的几件首创活动之一。当我们朝着希格斯粒子的发现稳步前进时，麦克、亚当、加万以及这部纪录片将时不时地在书中再次出现。

总而言之，经过多年研发、八年建造，我们终于等到了这一刻，站在了启动按钮之前！

时间是 2008 年 9 月 10 日，地点是 CERN。来自全世界的记者挤爆了控制室，其中也包括之前提到过的布赖恩·考克斯。BBC 电台第四台专门为那一天制作了特辑——“大爆炸日”。那时我已经从 CERN 回到伦敦，正坐在西敏区的一个大礼堂里，一同出席的还有内阁大臣约翰·德纳姆（John Denham，时任创新、大学及技能事务大臣）以及其他众多杰出之士和大量记者。对物理学家而言，身处大群媒体和政治家之中和他们打交道，是令人紧张、从未有过的经历。然而更令我们紧张的是，经过这么多年的准备工作，实验终于要启动了！

启动过程经过精心设计，这要归功于林·埃文斯（Lyn Evans）。他是 LHC 的带头人，控制室中的指挥家。质子束以八等分的形式送进 LHC。也就是说，27 千米长的隧道八等分，粒子束先飞过八分之一，进入一个束流收集器。之后飞达四分之一处，接着八分之三处，一直到环绕全程回到起点，在闪烁计数器上留下两个光点（出去一个点，进来一个点）。而数以千计的物理学家和全球众多媒体那时都紧盯着闪

烁计数器。

质子束打在束流收集器上，将会喷溅出粒子。若收集器后面放置了探测器，粒子就会在上面留下痕迹——我们都翘首以待这台复杂灵敏的设备记录到第一次粒子束活动。对我而言这却有不尽如人意的地方，因为林决定先将顺时针方向运动的粒子束送出，所以 ATLAS 排在了最后。我们也将最后一个观测到粒子，质子束经过我们之后就飞完了一整圈。林开始倒计时：3——2——1——前所未有的紧张，什么都没有发生。然后，欢呼吧，两个光点！我有生以来见过的最激动人心的两个光点。第一次，粒子束完美地飞绕了 LHC 一整圈！

随着时间推移，更多质子束从两个方向送出，又被成功回收。身在西敏区心系对撞机的我们因紧张而精疲力尽，纷纷走到隔壁的酒吧放松心灵。而 CERN 的加速器小组同事仍需勤奋工作。那是一个令人终生难忘的中午。酒吧电视屏幕下方走马灯般滚动着 BBC 的新闻滚动条，我悠闲地喝着啤酒，看着它递送着实验的最新资讯，而我是实验的一个设计者。此情此景，很难不让人以胜者的姿态洋洋自喜。次日的头条新闻郑重其事地宣称地球没有被我们这群物理学家毁灭。相当幽默，不过结论可能下得有些早（毕竟我们只是让质子束飞起来，还没有开始对撞）。无论如何，实验成功运行，而且我们也把这份激情传递给了公众。在这项困难重重的项目里，他们出钱，我们出力。我已经迫不及待地准备邀请新的博士生来到伦敦大学学院（UCL），向他们保证实验数据近在咫尺。

但仅仅九天之后，剧情却峰回路转，发生了灾难性的故障。

1.4　故障

之前我提到过，LHC 中质子能够达到的最高能量取决于向心力

——迫使质子在弯道处转弯以免飞出环道的力。而向心力由巨型磁铁提供。试想一块用细绳绑住的砖块，晃动细绳一端使砖块在你头顶旋转。如果旋转速度过快，细绳就会断裂。质子类似砖块，而磁铁类似绳子。我们当然不希望磁铁断裂。

在 LHC 启动之后的几天里，物理学家对它进行了多项测试。值得注意的是，当 9 月 10 日粒子束刚开始沿环道飞行时，磁铁尚未处于满负荷工作状态。

我们使用的磁铁是电磁铁,巨大的电流通过螺线管导体产生磁场。制造它们非常耗时耗力（共有 1232 块偶极磁铁，每块磁铁长 15 米，重 35 吨），不仅需要高超的工程、工业技术，也需要用到深刻的物理原理。

法拉第在 19 世纪就发现电能生磁，而磁亦能使通电的导线弯曲。之后麦克斯韦将之归纳成电磁场的动力学理论，即麦克斯韦方程组。它是物理学最精彩的方程之一，是人类首次将两种不同的作用力（静电力和磁力）用数学方程加以统一。这种大统一的思想成了后世理论物理学的趋势。

为了产生足够大的作用力弯曲质子束，需要在磁铁中通入非常高的电流。满负荷工作时，磁铁的螺线管线圈必须承载约 12 000 安培的电流。这是普通家用白炽灯工作电流的 50 万倍！

电流通过普通导体（例如白炽灯的钨丝）时，电流中的电子与导体中振荡着的原子发生碰撞。电流因此损失能量，而原子的振荡更加剧烈，使导体温度升高，这就是电阻。当电流高达 12 000 安培时，电阻将成为烫手的麻烦。由于温度过高，任何普通导体都会汽化。

超导体的发现改变了一切。超导体拥有零电阻的特性，电流在其中畅行无阻。这种令人惊叹的特性来自于量子力学效应，可以由巴丁、库柏和斯里弗的理论（BCS 理论，即超导的微观理论）解释。电子是

费米子，但在极低温度下，两个电子配对形成库柏对，表现出玻色子的性质。[1]因此，大量库柏对能够处于同一量子态（这种现象称为凝聚），叠加在一处。此时，改变其中一对库柏对就相当于改变整个凝聚态。而由于所有库柏对都处于同一量子平衡态，所以改变它们需要非常高的能量。总之，电子和导体原子碰撞的能量不足以改变它们——至少当导体处于极低温度下，其中的原子几乎不振荡时将是如此。所以形成库柏对的电子可以既无阻碍亦无损耗地在导体中流动，感受不到任何电阻。

LHC 中的磁铁是超导体。利用液氦可以将它的温度冷却到 1.9 开尔文（–271 摄氏度）。[2]

9 月 19 日，研究小组为了检测磁铁的性能，将电流升高到了满负荷——此时电流强度足够使粒子束获得最高设计能量。LHC 由八个独立的单元运作，每一个单元都可以分别充电、预热或冷却。他们已经令其中的七个单元满负荷运作，正在调试第八个，也就是最后一个单元。距离质子束的首次对撞几乎只有一步之遥了。

这时突然间，第八个单元的监视器和传感器上所有信息都消失了。

当时我正在伦敦远程监视仪表，故障发生后只看到一个通知，告知“首次对撞”至少要推迟好几天。不幸的是，实际情况糟糕多了。那里发生了灾难性的爆炸事故，爆炸将几块巨型磁铁冲出了用于固定它们的结构之外。质子束首次对撞因此被推迟了一年多。

蜂拥而来的记者，甚至包括一次早新闻的电话采访直播，让我解释究竟发生了什么。这是很尴尬的事情，老实说，除了知道情况不容乐观之外，我对故障也是一头雾水。更让我尴尬的是，我不得不亲自

① 参见“术语：玻色子和费米子”（第 32 页）。

② 这比外太空的温度还要低，宇宙微波背景的温度是 2.7 开尔文。但这仍非宇宙最冷的地方。旋镖星云的温度只有 1 开尔文。我不知道为什么它的温度如此低。

告诉那些受了我的鼓舞、以为“万事俱备，只欠东风”的博士生们，对撞实验数据的东风大概要很久以后才能吹到了。我强调这是“向前走两步，往后退一步”，但后退的那一步却是一大步。

随着时间推移，故障真相慢慢显露。这又是一个“千里之堤，溃于蚁穴”的例子，两块磁铁之间的连接器发生了故障，而起因则是焊接点的一条小裂缝。裂缝让连接器产生了小电阻。如果仅仅如此，问题虽然严重，但也不致演化成灾难性的后果。作为一种专业性风险，设计磁铁时人们就已经考虑到了部分超导系统瞬间产生电阻的情况，它会导致“淬火”。超导磁铁对此有一套周密策划的防护系统，一旦发生淬火，携带巨大能量的电流会立刻被引导出去，以免磁铁过热损坏。

不巧的是，淬火防护系统并没有覆盖到连接器。所以电流无法被安全地引导出去，连接器也因此汽化损坏。

如果仅仅如此，虽然是个大问题，将导致几个月的延迟，但仍然不致演化成灾难性的后果。但无巧不成书，连接器汽化之后留下了空隙，而无处可去的电流只能从空隙中迸出。迸出的火花刺破了液氦罐，数以吨计的液氦瞬间变成氦气。这是眨眼之间的事，一次爆炸！爆炸如此强烈，撕裂了重达 35 吨的磁铁，将它们冲出固定结构。好几块磁铁因此损坏，严重的甚至彻底报废。而精密的仪器和脆弱的低温系统也变成了一堆杂乱缠绕的废铁。这一切意味着，在机器投入正常使用之前，我们需要等待很长一段时间，完成大堆修复工作。

1.5　当我们等待的时候

前事不忘，后事之师。

和任何大型项目一样，总会有一些人对花费了大量资源心怀不满，

同样也会有一些人反感公众和媒体对造福人类的科学项目漠不关心的态度。而且，虽然我不知道原因，但似乎在普通人的印象中，粒子物理学家经常是清高傲慢的。总之那时候，我们这些沮丧的 LHC 物理学家不仅感受到了众多发自内心的同情，也有别人的幸灾乐祸。

而且别忘了，粒子物理学术圈中也有相当一部分人认为，在 LHC 启动之时与媒体以及公众进行互动就是个错误。我的许多同事觉得，如此大张旗鼓地互动，最好的结果也是自寻烦恼，而最差的结果则是导致媒体离谱外行的宣传。而在这个备受关注的公众事件仅仅九天之后机器就发生了故障，就好像专门给人逮到机会说“不听老人言，吃亏在眼前”。让我感到沮丧的主要是实验的推迟。而且有一段时间我也确实觉得，我们在众目睽睽之下被当成了大傻瓜，所以在获得实验结果之前，最好还是低调地保持沉默。

2008 年 10 月，事故发生后不久，我们举办了 LHC 的“落成典礼”。在事故发生之前我们就已经策划了这次庆典，可惜突然出现的故障让它变得有些不自然。典礼在巨大的磁铁测试大堂举行，这里不久之后就会重新开放，用于测试（再测试）已经整修一新的磁铁。损坏的机器就在我们脚底地面下，等着用新磁铁进行修复。虽然对 CERN 和 LHC 怀有浓厚兴趣，但时任科学及创新事务国务大臣的保罗·德雷森男爵（Paul Drayson）并没有出席。我并没有责备他。坦白说，那是个令人垂头丧气的典礼。

但这种情绪慢慢发生了变化。

尴尬情绪几乎成了自豪情绪的来源。当然，磁铁连接器的故障本来不应该发生。但在故障修复过程中，目睹加速器物理学家和工程师激烈讨论、调试着系统，我强烈感受到了 LHC 令人惊讶的复杂程度。而将如此多新技术装配进这个庞然大物中是多么巧夺天工的举动！我们不仅站在了物理学最前沿，也站在了工程学最前沿。更令人欣慰的

是，没有一个人在这次事故中受伤。事实上，LEP 和 LHC 土木工程的规模堪比英法海底隧道工程，而因此受伤之人寥寥无几。

任何研究都伴随着风险。项目带头人林·埃文斯在多次访谈中说过，LHC 的原型机就是它自己。地球上不存在任何类似的项目。对于我们这群 9 月 10 日在摄像机前瞪大眼睛紧张不安的物理学家而言，虽然许多人因为首次上电视直播而有些紧张，但更令我们紧张的是实验成功或失败的可能性。相似的紧张感只在太空科学家脸上出现过，出现在当他们看着喷射着烈焰的火箭搭载着自己精心设计的卫星往轨道飞驰而去的时候。①

这是在众目睽睽中进行科学研究。而残酷的现实就是，科学研究永远不会一帆风顺。向前走两步，往后退一步，就是如此。

对媒体而言，这次事故只是将波澜起伏的故事延长了。而且他们对待我们的方式也是人之常情，除了（或者也应该说，包括）一些在娱乐节目中偶尔出现的嘲笑言论。

至于说到沮丧，确实一时难以排遣，不过还有一些更重要的任务需要完成。我们把自己关在屋子里，将已经过时的 Linux 操作系统进行升级。之前因为担心错过“近在咫尺”的数据而一直不敢从事这项工作，现在可以做了——还有软件中的许多漏洞，现在也有足够时间加以修复。其中一件意义重大的工作就是，我们终于淘汰了过时的喷注探测软件。不过为了说清楚这件事，需要先解释一些概念。

---

① 在伦敦大学学院米拉尔太空科学实验室（Mullard Space Science Laboratory）的一个陈列柜里，收藏着一些扭曲的电子器件残片。它们是第一期星簇计划（Cluster mission）失败的产物。1996 年，阿丽亚娜五号运载火箭因软件故障在法属圭亚那的发射基地发射后不久坠毁，搭载的卫星残片后来在库鲁（Kourou）沼泽中被打捞了出来。真是让人一蹶不振的失败！但星簇计划并没有因此终止，星簇二号探测器在 2000 年被成功送上太空，开始其科学使命。

术语 夸克、胶子和喷注

喷注（jet）是大量夸克和胶子飞速逃逸时组成的喷射流。

每个质子（准确说是每个强子）都由一些夸克通过胶子粘合而成。正如光子传递电磁力、W 和 Z 玻色子传递弱力，胶子是传递强力的介质。电磁学存在电荷的概念，强相互作用理论也存在“色荷”的概念，它由美国物理学家奥斯卡·格林伯格（Oscar Greenberg）提出。此“色”与眼睛所见的颜色没有任何关系，但它们可以相互类比。

对电荷而言，若要得到电中性，只有一种可能——反电荷（即负电荷）量正好等于正电荷量。原子是电中性的。由于原子核中的质子数（质子带一个正电荷）和原子核外电子云中的电子数（电子带一个负电荷）恰好相等，所以正电荷量和负电荷量相加得到的总电荷量为零——它们相互抵消，所以原子呈现电中性。

色荷亦同此理。如果我们（任意地）命名一种色荷“红”，则另有一种色荷对应“反红”。（或许你更倾向于称呼它为“青”，因为青是红的互补色。但我觉得，如此命名就让强力的色量子数与可见光颜色之间的类比显得过于牵强附会了。）等量色荷和它的反色荷可以形成色中性的粒子，它们总称为介子。[①]但与电磁学（更准确地说，应该是它的量子力学版本，学名为量子电动力学，QED）不同的是，对强相互作用理论（学名为量子色动力学，QCD）而言，还有另一种方法可以形成色中性的粒子。

在现有理论中，一共存在三种色荷，通常（依然任意地）命名为

---

① 介子的英文名 meson 来源于希腊语 meso，意为“中间的”，因为介子的质量比质子和中子轻，却比电子重，介于两者之间。介子由一个夸克和一个反夸克组成，由于它们含有我们（任意地）称为“红”和“反红”的色荷，两者抵消，所以呈现色中性。如果你倾向于称呼它们为“红”和“青”，那么两者混合形成白色。

红、绿和蓝。将等量的三种色荷混合，也可以形成色中性的粒子，如同将三原色混合形成白色一样。质子和中子就是这样形成的，每个质子或中子包含三个夸克，分别携带三种色荷，所以总体呈现色中性。由三个夸克组成的粒子总称重子（baryon，来源于希腊语 barys，意为“重的”），而质子和中子是最常见的重子。介子和重子同属于强子，因为任何由夸克组成的粒子都是强子。

夸克有个古怪的特性：物理学家从来没有发现过独来独往的夸克。它们永远成双结对地禁闭在色中性的强子中，而原因则是同样古怪的强力。

基本作用力通常随着距离增加而减弱——譬如正、负电荷之间的电磁力随着它们距离的增加而减少（力的大小与距离的平方成反比，$1/r^2$）。然而强力却特立独行：将两个夸克拉开，它们之间的力不减反增，如同连接着橡皮筋或弹簧。夸克分开时，弹簧拉紧，因此储藏了大量弹性势能。

在 LHC 中，当质子内的两个夸克碰撞反弹时，它们携带着巨大能量，以接近光速分道扬镳。但在反弹前，“弹簧”处于松弛状态，所以它们受到的力很小。这种现象叫做“渐进自由”（asymptotic freedom）。2004 年的诺贝尔物理学奖授予戴维·格罗斯（David J. Gross）、戴维·波利策（David Politzer）和弗兰克·维尔切克（Frank Wilczek），以表彰他们“发现强相互作用理论中的渐进自由”。渐进自由意味着，出于理论研究或者计算的考虑，你可以近似认为夸克在质子内部是自由的，并未束缚在一起。

然而，这种暂时的自由只是镜花水月。一旦妄图将夸克从质子中解放，例如在 LHC 中，用逆向运动的质子中的夸克加以撞击时，自由就会消失。虽然撞击瞬间夸克彼此飞离（在加速飞离时甚至辐射出更多胶子和夸克），但弹簧也几乎同时拉紧，将它们束缚。所以夸克和胶

子心知肚明，它们没有真正的自由。

之后发生的事情更加有趣。夸克分开的距离越大，“弹簧”的拉力越强，它们之间储存的能量也越高，甚至高到足以生成一对新的夸克和反夸克。但天下没有免费的午餐，若要生成新的夸克，就需要消耗能量，而消耗能量的大小等于夸克和反夸克的质量之和乘以光速的平方（$E=mc^2$，也许你早就知道了）。这些能量的消耗换来的是更短的弹簧和小得多的弹性势能。

你可以把夸克想像成弹簧的两端。刚开始它们彼此分开，直到某一时刻弹簧断裂，产生两个新的端点（新的夸克）。

最终，我们将看到大量强子喷溅而出。或许你会认为这对观测基本粒子内部的结构（夸克、胶子等）毫无帮助，但喷溅的过程中信息并没有丢失。对撞时，将原有夸克踢出质子的力度如此之大，以至于大量强子如水注般喷涌而出，所以称为喷注。质子的分裂和生成的新夸克、胶子瓜分了能量，但它们能量的总和仍然远小于原有夸克从对撞中获得的能量。所以最终，喷注的方向几乎就是原有夸克被踢飞的方向。

当然，“几乎就是”并非科学用语，我们需要将之量化，越精确越好。而喷注算法就是量化工具。通过喷注算法，你可以将对撞中观测到的强子（实验数据）以某种方式结合形成喷注，推导出它的能量和动量，再将结果同理论预测值相比较。你可以设计出多种结合的方式，但必定会有一些方式从中脱颖而出。

设计（或选择）实用的喷注算法时需要考虑一个因素：理论无法预测低能标下的物理。低能标对应于（相对而言）大的距离，这时弹簧将处于拉紧状态，大量强子正在生成，而众多能量很低的胶子四处抛洒。由于理论无法预测生成的低能胶子数量（话说回来，我们既无法测量它，也不想测量它，而且它的数值还存在涨落），所以设计一个对低能胶子数不灵敏的喷注探测软件似乎是个不错的主意。事实上，

这至关重要。用来描述“不灵敏”的专业术语是“红外安全”（Infrared Safety）。趁着 LHC 修复期间，我们淘汰了旧算法，转移到了另一个红外安全的喷注算法。

1.6 名字、惯性和媒体

在 2008 年，ATLAS（和 CMS）的分析代码采用的主要喷注算法不是红外安全的。机器故障之后，我们将它升级成了更新、更强且红外安全的算法。因此，我们之后所做研究的质量也得到了大幅提升。

或许你会问，既然改观如此明显，为什么不早点升级？问得好！这个问题的答案将让你了解大型合作项目中科学研究（以及物理研究）是如何进行的。

许多年前，我还在汉堡为 HERA 工作，CERN 仍在运行 LEP，而美国芝加哥费米实验室的 Tevatron（正负质子对撞机）还在寻找顶夸克。那时候，物理学家已经成立了一些临时合作组，为筹建中的 LHC 设计探测器。ATLAS 合作组就合并自其中的两个合作组——EAGLE（Experiment for Accurate Gamma, Lepton and Energy Measurement，伽马、轻子和能量精确测量实验）和 ASCOT（Apparatus with Super Conducting Toroids，超导环面仪器）。此类合并经常发生。所以给合作组取名时，千万不要在首次提案中就用上你能想到的最好名字，因为几乎可以确定，你的提案需要和别人的提案合并，而那时你们必须再提议新名字。我只能腹黑地推测，CMS 合作组就犯了这个错误。或许它合并之前的临时合作组有一些很酷的名字，譬如 TITAN 或 JOR-EL[①]，但合并之后才思枯竭，难以提出好名字，所以只能采用 CMS

① 当然，实际并非如此。

这个没有内涵的缩写。

不管怎么说，ATLAS 是个好名字。干得漂亮，彼得·詹尼（Peter Jenni）和他的伙伴们！

比取名稍微重要的是，你需要证明你设计的探测器能胜任物理工作。它是否拥有足够的分辨率？是否拥有足够的带宽读取数据？是否在恰当位置放置了足够多的探测器，以保证不错过任何想要观测的东西？另外，筹集的经费是否负担得起它的造价？为了让回答更有说服力，你需要撰写专业的设计报告。而为了撰写设计报告以及说服其他人支持建造你设计的探测器，你首先需要做一系列粒子束测试实验。在测试实验里，你将粒子束打到原型机中，以证明你对它们理解透彻。同时你也会用到大量软件，一些软件用来模拟物理过程和探测器，另一些软件利用模拟数据（或粒子束测试实验数据）重建可能得到的最终测量结果。

这意味着，当我们等待首批数据到来之时，有一些人已经为这个实验工作了十年甚至更长时间。他们已经习惯了十年前老掉牙的工具。即使在这十年里，其他研究机构的实验数据不断累积，物理也因此与时俱进，有了长足发展，更好用的工具也开始出现，但如果试图改变他们的习惯，还是会遭遇巨大的惯性阻力。在迎接首批数据的准备工作成为当务之急时，对任何改变或创新持抗拒态度也是可以理解的。总之，这就是 2007 年我们对 ATLAS 所持的态度。

当时的喷注算法就属于老掉牙的工具。从 1990 年到 2000 年的十年时间里，由于 HERA 和 LEP 累积了大量实验数据，再加上理论物理学家不舍昼夜地工作，人们对喷注和强相互作用理论（量子色动力学，QCD）的理解进展飞速。红外安全的问题已经被攻破，而新一代喷注探测软件也已经排上日程。但不幸的是，ATLAS（很大程度上还包括费米实验室）在很早以前就已经采用了旧喷注算法，而且当时新算法

还存在一些问题：一些算法运行速度太慢，而大多数算法会生成不规则形状的喷注，这种喷注极大地影响了我们对实验分辨率和效率的了解。虽然 HERA、LEP 和费米实验室也使用新算法进行测量（事实上，HERA 和 LEP 最终完全投向了新算法），但人们仍然怀疑它能否在 LHC 中发挥作用。疑虑、惯性和时间的紧迫性，让我们没能在 2008 年之前及时改变。

当然大家心里明白，一旦用旧算法处理了一些数据，就更难换向新算法了。所以在实验数据到来之前意外多了一年，简直是天赐良机让我们投向更新、更强大的技术，一劳永逸。更重要的是，物理学家似乎已经很好地解决了新算法运算速度慢、生成的喷注形状不规则的问题。[①]在喷注研究主持人的安排下，几十名博士后和学生开始测试新算法的可行性。新算法不仅要在理论上可行，还要能够实际用于软件中，ATLAS 探测器将用这些软件选择、分析实验数据。其中一些人的工作地点在 UCL，而我对大量内部笔记进行了编辑整理。我们的努力终于让每个人都相信，是时候改变了！我觉得，这段时间花得很值，而且令我一改沮丧心情。

期间还有一件事情，虽然和 LHC 没有直接关系，也刺激了我的神经。那是 5 月 18 日在伦敦霍尔本一家名为“彭德雷尔的橡树”酒吧中举行的“怀疑论者在酒吧”集会。这是我首次参加这种集会。虽然在这个主要讲述 LHC 来龙去脉的故事里，这像是一件随机插入的无关之事，但相信我，它确实有些联系。

西蒙·辛格（Simon Singh），一位拥有粒子物理学博士学位的著名科普作家（他曾经在剑桥大学为 LEP 工作，和他共事的一些人现在

---

① 关心技术细节的读者可以参考马泰奥·卡恰里（Matteo Cacciari）、加万·萨拉姆和格雷戈里·苏瓦耶（Gregory Soyez）的论文（http://arxiv.org/abs/0802.1189）。经验表明，他们提出的所谓 anti-k_t 算法是已知最佳解决方案。

是我在 ATLAS 合作组的同事），被英国脊柱按摩疗法协会（British Chiropractic Association）以诽谤罪起诉。起因则是辛格发表的一篇文章，批评按疗协会在没有可靠证据的前提下大肆宣扬他认为其实是“虚假治疗”的按摩疗法。鉴于辛格确实认为治疗是虚假的，又鉴于按疗协会确实在宣扬按摩疗法，所以你可能会认为辛格的文章是否构成诽谤的争议点在于按疗协会到底多么“大肆”宣扬。但不幸的是，英国的诽谤法完全就是一坨屎。看起来辛格若要为他在文章中表达的客观评论作辩护，他就必须证明按疗协会在疗效问题上众目昭彰地撒了谎。这意味着，只要按疗协会坚持表示他们并不相信按摩疗法是虚假治疗，辛格的辩护就会无效，而他们也可以万事大吉。辛格说服上诉法庭相信，**他**并非必须证明按疗协会知道治疗是虚假的，而只要提供充分的理由显示按疗协会知道。官司暂时到此为止，因为按疗协会撤销了诉讼。

我之所以参加这个集会，一方面是因为义愤填膺，不忍坐视法律被用来压制基于科学的言论，另一方面也是因为霍尔本距离 UCL 在布卢姆斯伯里的校区只有一步之遥，所以顺便和朋友去喝点小酒。去了才发现，我收获到的不仅是啤酒。我遇见了一大群聪明、勤奋且博学的记者，他们为报社和电视台工作。我也遇见了好几位杰出的作家，他们在博客及其他网络媒体上撰文。我不得不承认，他们的存在令我有些震惊。出于我的傲慢和无知，我一直不曾意识到，在学术圈之外还存在这样一群人，比我还要了解和关心科学和理性。相对于诽谤事件带来的令人沮丧、不容乐观的氛围，这无疑令人欢欣鼓舞、激动万分。集会不只是针对辛格事件，彼得·温赫斯特博士（Peter Wilmshurst）也因为研究心脏移植手术的术后健康效果而被起诉。其他人已经撰写了比我好得多的文章，揭露诽谤法如何被富人和大公司利用而对科学讨论造成令人心寒的伤害。当辛格宣称他将继续为之斗争时，尽管很

勇敢，但看起来不太可能成功。不管怎样，人们已经开始策划一场运动，目的不仅是为了帮助他，更是为了修订诽谤法。只要去做了，就会有一点成功的希望。

一些作家因此成了我的好朋友，而开展的运动也取得了一定程度的成功——新的诽谤法加入了一些特别条例，对同行评议的科学加以保护，它在 2014 年初生效。英国脊柱按摩疗法协会也不再纠缠辛格了。皆大欢喜！但回顾这段经历，对我而言另有重要收获。

这次运动打破了存在于科学界、学术圈（虽然与科学界有交叉，但还是很不一样）以及另外诸如娱乐圈、政界之间的一些隔阂。对我而言这是全新体验，对我今后如何跟人们宣传我们在 LHC 上所做的工作也产生了极大影响。我的老朋友和合作者布赖恩 · 考克斯（我们在他如暴风雨般清除掉那些隔阂之前就已经认识），为我们继续打破隔阂减去了许多阻力（他也参加了“彭雷德尔的橡树”酒吧集会）。但除此之外还有其他事情。尽管我在诽谤法修订运动中只是做了一些小事，诸如写信、参加会议、选举委员会之类，但我也因此得以与其他圈子的人全程保持联系、相互理解。

这些事大大减轻了我对媒体和政治的恐惧和怀疑，而且让我明白了如何有效地游说政府。再加上 2010 年由爱丽丝 · 贝尔（Alice Bell，当时她还在伦敦帝国学院）和英国生物化学学会的贝克 · 史密斯（Beck Smith）组织的“科学博客谈话会”，所有这些诽谤法修订运动的活动最终令我能够在公众场合和媒体上自如地谈论科学。

在不同圈子中谈笑风生的能力对我而言不可或缺，而尽管面对面的交流对提升这种能力仍然重要（如果有酒精的帮助，我也可以应付得来），类似博客和社交媒体的在线服务也能起到积极作用。诽谤官司陪审团的一个成员阿洛科 · 杰哈（Alok Jha）在爱丽丝和贝克的谈话会后找到了我，邀请我参加《卫报》新开辟的科学博客栏目。

特别要提及的是，在推特上交流想法也给了我很大帮助。拥有能够被众多科学界同事和媒体联系人阅读的博客和推特账号提升了我的自信心，让我在其他场合面对更多听众时也能言笑自若。几个月后的一天，我坐在出租车上赶去参加 BBC 广播第四套节目的《今日》栏目，接受约翰·汉弗莱斯（John Humphrys）的采访。意识到如果我说了一些愚蠢的话或者言词被曲解，至少还可以发推特或者博文加以解释，我心情就轻松了许多。对科学家而言，一件可怕的事情就是受媒体邀请在节目中露面，笼罩着专家的光环，被要求在几分钟内描述完本职工作及其意义。而拥有能够与观众直接接触的途径大大改变了这种状况。

事后证明，在那次《今日》栏目中，约翰·汉弗莱斯表现出色，而我也没有出现值得动用万维网道歉的举动。但我依然深爱着这个由蒂姆·伯纳斯-李爵士（Tim Berners-Lee）在 CERN 我楼下的办公室中发明出来的工具。它和其他许多发明一起，拉近了 CERN 的科学与外面世界的距离。

术语　　玻色子和费米子

在有关寻找希格斯玻色子的报道中，“boson”（玻色子）一词带来了无尽的困扰。它常常被拼写成“bosun”，而有一次在接受电视采访时，我瞥见主持人面前的电子提示屏上出现了“bosom”的拼写。但就像一位真正的业内人士，主持人克里希南·古鲁-穆尔蒂（Krishnan Guru-Murthy）毫不犹豫地念出了正确的拼法“boson”。

玻色子是一类粒子的总称，希格斯玻色子是其中之一，它还包含许多其他粒子。在标准模型中，所有传递作用力的粒子都是玻色子，如胶子、W 子、Z 子、光子。如果引力子存在的话，它也是玻色子。

夸克、电子和中微子则属于另一类粒子，称为费米子（fermion）。

两者的差别在于自旋，自旋是代表角动量的量子数。自旋听起来好像意味着粒子在旋转，但这仅仅只是类比，因为点状基本粒子无法旋转。而且如果非要类比经典物理，假设粒子确实在旋转，费米子的自旋大小也意味着它需要旋转两圈才会回到原来状态。量子力学中充满这种误导性的类比。

不管这些，总之自旋至关重要。根据定义，玻色子的自旋为整数。希格斯粒子的自旋为 0，胶子、光子、W 和 Z 玻色子的自旋为 1，而假设中的引力子自旋为 2。夸克、电子和中微子是费米子，它们的自旋为半整数，$^1/_2$。这种差别导致了玻色子和费米子行为的巨大差异。

人类目前对基本粒子最深刻的理解当属量子场论。在量子场论中，“量子态”（简称“态”）是一种构型，描述一个系统（比如氢原子）的所有粒子。它遵从的数学是：交换两个能量相同、不可分辨的费米子（例如两个电子），量子态将会多一个负号；而交换两个相同的玻色子，就不会出现负号。

由于交换两个能量相同、不可分辨的粒子对物理系统没有任何影响，所以当你计算系统总量子态出现的概率时，需要将两种不同的情况（交换和未交换）相加。对费米子而言，正号和负号相抵消，结果为零。而对玻色子而言，两个正号累加。这意味着含有两个能量相同、不可分辨的费米子的量子态出现的概率为零，而含有两个能量相同、不可分辨的玻色子的量子态出现的概率大增。

如此简单的数学却关系着元素周期表和所有元素的性质。每种化学元素都包含一个原子核，核外环绕着若干电子。由于电子是费米子，它们无法同时占据原子核外的最低能级，因为根据前文的讨论，这种“态”出现的概率为零。如果原子核外存在着更多电子，它们就要往更高的能级上排排坐。能级越高，离原子核越远，原子核对它们的束缚也越小。而化学元素的性质，例如在元素周期表中的位置、与其他化

学元素的反应方式，则决定于最外层电子受原子核束缚的大小。

玻色子聚集在一起，也会发生奇妙的事情。其中一种效应称为凝聚，它关系着制造 LHC 磁铁的超导体材料。它甚至关系着整个化学，因而也关系着生物学和整个世界。

为了扩充标准模型，使传递作用力的玻色子和构成物质的费米子相关联，一些理论在玻色子与费米子之间引进了新的对称。这种对称在数学上如此美妙，以至于人们给它冠上“超”字（超对称）——不过，这是另一个故事了。

1.7　第一届“提速”会议

在 LHC 修理期间我们终于有时间做的另一件事情是，利用模拟数据进行更全面的研究。

老实说，由于做得太多，现在我们中的大部分人看见模拟数据就感到恶心。我从 2005 年离开 ZEUS 合作组开始就不再分析真实数据，而只做一些模拟研究。一个好程序自有趣味在其中，而且通过电脑建模可以学到许多东西。但如果没有真实的实验结果，一切都是纸上谈兵。

我们现在已经有了更好的软件。其中一些软件的改进得益于在 LHC 故障之前成功实现的少量“粒子束喷溅”事例中搜集而来的数据，以及 ATLAS 搜集到的宇宙射线数据。宇宙射线即持续不断从外太空轰击地球的粒子。[①]

亚当和我现在也有时间继续发展我们关于提速的希格斯（boosted Higgs）的分析算法。在 1.3 节我提到过这件事，现在可以

① 参见 2.2 节“最小偏差”和 4.2 节“科学委员会”。

展开来说了。

由麦克·佩特森制作，由加万、亚当和我担任嘉宾的纪录片《对撞的粒子》在教师群体中大受欢迎。纪录片详细展示了科学家如何进行粒子物理研究，而且看起来令人满意地实现了计划的目标，切中了总是在改的国家课程关于如何进行科学研究的课程要求。不过，虽然这部纪录片的内容部分基于我们写的一篇关于寻找希格斯粒子一种可能方法的学术论文[①]，其实里面并没有多少真正的物理。英国物理学会出版的《物理世界》（*Physics World*）中有一篇影评善意地指出了这一点。

对于这个客观的评论，我觉得有必要加以回应。所以我撰写了人生的第一篇博文，试图解释那篇论文中的物理。原始博文侧重于解释论文中的创新想法，而没有概述为何希格斯玻色子非常有趣，所以我对它进行了改写，并附在下面。

> 截至撰写这篇文章之时，我们能够确信：假若存在希格斯玻色子，而且它的质量等于预测最可能出现的数值（约120 GeV[②]），那么LHC将对撞出大量希格斯玻色子。困难之处在于，如何将它们从一同对撞出的其他东西中分离出来。
>
> 标准模型中的希格斯玻色子是充盈全宇宙的量子场[③]中的一种波，更确切地说，是一种激发态。粒子的质量来自它们与量子场的相互作用，而质量大小取决于它们“耦合”（或者说粘住）量子场的方式。这意味着希格斯玻色子可以与所有粒子耦合，因此它也最可能衰变到允许生成的最重粒子。

① 在纪录片中这篇论文被称为“欧洲之星论文”，以表示它也是英法合作的一个成果。

② 吉电子伏特（GeV，10^9电子伏特）。电子伏特是物理学家喜欢用来度量质量和能量的单位，我会在2.1节对其进行解释。

③ 参见“术语：场、量子以及其他”（第59页）。

衰变的发生只在刹那之间，所以我们只能观测到衰变后的产物。从这些产物中，我们需要逆向分析出对撞机是否产生了希格斯玻色子。

如果希格斯玻色子的质量是 120 GeV，它能够生成的最重粒子是一对底夸克。夸克总是成对出现。上、下夸克足以形成所有质子和中子，但因为一些尚未完全理解的原因，还存在着奇异夸克和粲夸克（分别与下夸克和上夸克相似，但质量更重）以及底夸克和顶夸克。奇异（strange）夸克之所以如此命名，是因为证实它存在的第一个证据来自于宇宙射线相互作用中的一种粒子，这种粒子性质非常奇特（简单地说，就是比预测的生命期更长，而且衰变方式很古怪）。粲（charm）夸克听起来像个令人粲然的名字，估计当时它的发现令物理学家欢呼雀跃，因为它解释了弱相互作用中一些棘手的问题。最后两种夸克被发现时，有人曾提议将它们命名美（beauty）夸克和真（truth）夸克，估计是由粲夸克外推而来的。这也说明外推法可能带来多么不靠谱的结果……不管怎样，现在大家都叫它们顶（top）夸克和底（bottom）夸克。顶夸克直到 1996 年才在费米实验室中被发现。在那之前，底夸克还没有对应的同伴，所以物理学家提出了种种不包含顶夸克的理论模型。而这些模型通常拥有很搞笑的名字［光屁股（bare-bottom）模型、露胸脯（topless）模型，等等，你懂的］，顶夸克的发现终于让人们从这些模型中解脱了。

不小心跑题了，言归正传。假若希格斯粒子质量介于 120 GeV 到 130 GeV 之间，它的能量将不足以衰变到顶夸克、W 和 Z 玻色子，所以最可能衰变到底夸克。

底夸克也会衰变（运动约 100 微米后），每个底夸克形成

一道强子喷注。通过探测器，我们可以观测到其中一些粒子。根据观测数据，就有可能逆向分析出是否有两个底夸克衰变，以及它们是否来自同一个希格斯玻色子衰变。

一言以蔽之：如果对撞出希格斯玻色子，它将衰变到两个底夸克，之后形成两道强子喷注。

但麻烦的是，LHC 将产生越来越多底夸克和强子喷注，而其中大部分与希格斯玻色子没有任何关系。在我们的论文出现之前，人们普遍认为有用信号将被背景噪音完全淹没，所以只能通过其他非常罕见的希格斯玻色子衰变来寻找它。这样做不仅使寻找变得更困难，而且就算能够在其他衰变过程中发现希格斯玻色子，我们仍然需要它衰变到底夸克的观测数据，因为这对证实发现的粒子确实是标准模型中的希格斯玻色子至关重要。

我们在论文中提出的解决方案是，只选择观测某类对撞事例。这些对撞事例不仅需要生成希格斯粒子，而且必须是动能极大的希格斯粒子——运动速度至少达到光速可观的几分之一。在我们模拟的希格斯粒子生成事例中（假设达到 LHC 设计能量 14 TeV，TeV=10^{12} eV），约有百分之五的对撞事例属于这种情况。因此，如果只观测速度很大的希格斯玻色子，我们将忽略掉大部分希格斯玻色子。事实上，LHC 启动时的对撞能量还要小，因而被忽略的希格斯玻色子只会更多。但这样做也有好处，因为通常背景粒子喷注的能量都很低，所以同时也将忽略掉数量更多的背景噪音，即那些与希格斯粒子无关的对撞事例。

当观测高速运动的希格斯粒子衰变时，还有一个需要注意的现象。希格斯粒子的速度越大，它衰变而成的两个底夸

克之间夹角就越小，以至于两个夸克形成的喷注通常会合并成一道喷注。

如果将底夸克生成的两道喷注作为希格斯玻色子存在的关键信号，这个现象就会成为麻烦。这就是之前所有研究碰到的瓶颈。而在我们的论文中，麻烦反而变成了优势。通过观测喷注的内部结构，我们将会在次级结构中发现两个底夸克和希格斯粒子衰变的证据，消除大部分背景噪音的影响，精确测量希格斯玻色子的质量，使其在剩余背景噪音中脱颖而出。原来看似毫无希望的现象却变成了在 LHC 上寻找希格斯粒子最有前途的方法。

在喷注次级结构中寻找高速运动粒子衰变的想法之前已经由麦克·西摩（Mike Seymour）提出[①]，又由布赖恩、杰夫和我的合作论文[②]（在 1.2 节提到过）加以深化。但加万想到了更好的实现方式。再加上亚当、马泰奥，我们是首次将之运用到希格斯玻色子搜寻工作中的人。

意外的一年延迟意味着，通过与 UCL 的博士后埃尔坎·厄兹詹（Erkcan Ozcan）以及德国弗莱贝格大学的一个小组合作，亚当和我能够在完全模拟环境下的 ATLAS 探测器中测试这个想法。我们发现，即使采用更符合实际情况的实验误差估值、对背景噪音进行更全面的研究，这个想法仍然发挥了很好的作用。

很快就有迹象表明这个想法将大受欢迎，因为加万和我出乎意料地收到了来自美国 SLAC（Stanford Linear Accelerator Center，斯坦福直线加速器中心）国家加速器实验室的邀请函，邀请我们在名为“给

① 参见：http://inspirehep.net/record/359650?ln=en.
② 参见：http://arxiv.org/abs/hep-ph/0201098.

新物理一次提速”（简称“提速”）的学术会议上介绍这个想法。那是2009年7月的事，在那时已经出现了大量论文，纷纷为寻找提速的粒子的衰变设计新方案，并强调各自在LHC中的应用。只要对撞机够给力，提速的重粒子的出现就司空见惯。所以，尽管对于两天的会议而言，从伦敦到SLAC的旅途太遥远了，但它还是值得我们一去。

SLAC位于加州门洛帕克，距离旧金山约40千米。老实说，我并不习惯国际长途航班，两天时间一直过得迷迷糊糊。但我仍然可以从会议讨论中明显感受到，令人激动的物理正在提速！至少我们已经计划2010年在英国牛津举办一个会期更长的后续会议。我记得那时坐在旧金山的海滨，边喝着蛤肉汤边等待回伦敦的航班，回想着两天发生的事情。无论发生了什么，总之是好事。

到2009年秋季，LHC完成了修复工作，至少CERN相信它能够让粒子束达到设计能量的一半——这已经比之前任何实验至少高 3.5倍。吃一堑长一智，我们已经准备就绪，迎接真实数据的到来。

第二章

重启

（2009 年 12 月—2010 年 3 月）

2.1 低能对撞和电子伏特

2009 年 11 月 23 日，LHC 中的质子束以 450 GeV 的能量开始对撞，LHC 终于成为名副其实的对撞机。

450 GeV 并非特别高的能量，例如芝加哥费米实验室的 Tevatron 能量就高达 1000 GeV。但这标志着我们首次在自己的探测器上测量到真实对撞事例。14 时 22 分，ATLAS 探测器首次记录到对撞生成的粒子。那一天，所有实验都记录到了数据。而从那时起，LHC 正式成为真实的物理实验。

如果你不是物理学家，可能会对前段提到的能量单位（GeV）稍感陌生。eV 是电子伏特（electronvolt）的缩写，而伏特专门用来度量电势。例如一节普通干电池的电势为 1.5 伏特。如果让电子在电势中降落（由于电子带负电荷，根据同性相斥、异性相吸原理，它会被电池的负极排斥，被正极吸引，从负极“降落”到正极），它会获得速度。

物体以一定速度运动时拥有能量，这种能量称为“动能”。电子在

一节干电池提供的电压中加速，能够获得 1.5 eV（1.5 电子伏特）的动能。这就是 1 eV 的定义—— 一个电子在 1 伏特电势中获得的动能。

鉴于电子非常微小，它的电荷量也非常小，所以 1 eV 其实是很少的能量。日常使用的能量单位是焦耳，它等于 1 千克乘以（米每秒）的平方（$kg{\cdot}m^2{\cdot}s^{-2}$）。动能可以用质量和速度近似表示成 $^1/_2mv^2$，所以如果 1 千克的物体（m）以 1 米每秒的速度（v）运动，它就拥有 $^1/_2\times1\times1^2=^1/_2$ 焦耳动能。需要非常非常多电子才可以凑够 1 千克。具体地说，1 焦耳等于 6.24×10^{18} eV，即 6.24 百亿亿电子伏特。[①]

很显然，在日常生活中将 eV 作为能量单位并不实用（如果你每次用餐摄入的能量属于电子伏特量级，你恐怕很快就会骨瘦如柴了），但在物理和化学中它用起来却得心应手，因为那里经常讨论移动少量电子所需要的能量大小。化学键对应于几十 eV 的能量，或者更多一些。譬如为了破坏水分子，你需要给电子提供约 500 eV 的能量。另外，当电子在原子或分子的不同能级间跳跃时，它们会吸收或发射光子——光的量子。钠灯中的电子在相隔约 2 eV 能量的两个能级间跃迁，散发出独特的昏黄光线，形成了我们熟悉的街灯美景。[②]由此可知，黄光光子的能量约为 2 eV。

X 射线的能量约为几 keV（千电子伏特）。这些能量足以将被原子核最紧密束缚的电子打出原子外。破坏原子核需要更高能量——MeV（兆电子伏特）。以上就是核物理的能量范围。

我之前说过，除非你是物理学家，否则你可能会对电子伏特感到陌生。不仅如此，除非你是天体或粒子物理学家，否则你可能会对 GeV（吉电子伏特）或 TeV（太电子伏特）感到陌生。只有在高能宇宙射线、

① 如果你对食物的卡路里更熟悉，那么 1 卡路里约等于 4200 焦耳，也就是 2.6 万亿亿电子伏特。

② 这种现象是光谱学的核心内容，我会在 7.3 节再次提及。

类似 Tevatron 的大型加速器或 LHC 中出现过此量级能量的粒子。在这种量级的能量下，破坏原子核就是小菜一碟，甚至原子核中的质子和中子也会被打得七零八落。如果世界的本质如同标准模型描述的，你甚至还可能将质子、中子里的夸克和胶子打得七零八落。

所以对单个粒子而言，1 TeV 是极高的能量。但由于粒子微乎其微，所以如果将 1 TeV 质子（比如说 Tevatron 中的质子）的全部动能转移到 1 千克质量的物体上，后者将几乎纹丝不动。[①]然而，拥有相同动能的质子却能以接近光速运动。

关于单位说得差不多了，让我们继续说 LHC。2009 年 12 月 8 日，星期二，开始出现有趣的事情了。

2008 年的那次灾难事件发生在磁铁的电流提升到足够弯曲 7 TeV 质子束之时。LHC 完成修复后，万事小心为上，所以重启方案是先将电流慢慢提升到足够应付 3.5 TeV 的粒子束。从 450 GeV（0.45 TeV）开始有很长的一段提升空间。随着加速器小组逐步提升粒子束能量，我们怀着紧张的心情仔细观察实验进展。

12 月 8 日，粒子束的能量在 LHC 小组的操作下继续慢慢提高，终于超越了 Tevatron 的最高纪录 1 TeV，全球能量最高的粒子束在 LHC 中正式诞生！但它们还未进行对撞。每个人都清楚，在那个星期二，粒子束中肯定会发生什么，所以 ATLAS 轮班组员无时无刻不在仔细监控着实验。他们甚至开启了部分探测器，虽然并没有关于对撞计划的通知。恰巧 UCL 的一些人也在场——在控制室值班的学生凯特琳・贝尔纽斯（Katrin Bernius），以及正在监视“事例显示器”的亚当・戴维森和尼科斯・康斯坦丁尼迪斯（Nikos Konstantinidis）。事

① 从之前的讨论中可知，1 TeV 等于 10^{12} 电子伏特，而 1 焦耳等于 6.24×10^{6} TeV，所以相当于你给 1 千克的物体转移了百万分之 0.16 焦耳的能量。从动能公式反推速度，你将算出 1 千克物体的速度约等于 0.6 毫米每秒。

例显示器是用来显示对撞结果的图形软件。

21 时 40 分，两束粒子束相交而过，其间发生了几次看起来完全像是意外的对撞。但 ATLAS 早就有备而来——轮班组员记录到了这些对撞，将它们传送到“事例显示器”组员，而后者又将它们传送给实验领头人法比奥拉·贾诺蒂（Fabiola Gianotti）。这是超越 Tevatron 最高对撞能量的第一次质子对撞！虽然对物理毫无用处（探测器磁铁甚至根本没有开启），但这是实验室有史以来最高能量粒子对撞生成的粒子首次出现在你的面前。那一刻，LHC 荣升最高能量对撞机。次日上午这个消息出现在了官网首页。也许有些小题大做，但很有趣！

2.2 最小偏差

2010 年 3 月，基于 LHC 对撞的第一批物理论文开始出现，其中提及了我们首先需要做的事情：测量平均（或“最小偏差”）对撞的性质。

想要准确定义什么是对撞并非易事。

LHC 中相互接近的两个质子会相互排斥，因为它们都携带正电荷，而同性相斥。电磁力随距离的平方反比递减。[①]例如两个质子间的距离加倍，力就减小为原来的四分之一。但无论相距多远，力永远不会减少到零。所以即使两个质子相隔几千米（还是不要太夸张，它们在 LHC 粒子束管道中其实只相隔几微米），它们之间也会存在很小的斥力，让它们稍微弹开一点点。这也可以称为一次“对撞”。

实际上，这种一掠而过的对撞无法被我们测量到。质子将继续沿着 LHC 粒子束管道飞行，永远不会进入 ATLAS 探测器。

距离更加接近的质子间存在着更强烈的散射，而且在多数情况下，

---

① 若两者之间的距离为 r，则电磁力大小正比于 $1/r^2$。

它们会对撞成碎片。在如此小的距离和如此高的能量下，电磁力其实已经不重要，质子间的相互作用大部分来自强力——量子色动力学：关于夸克和胶子的理论。

强力是短程力，它的作用范围几乎不超出原子核。但在它的地盘里，它是当之无愧的**强**。即使是质子内两个带正电荷的夸克间巨大的电磁斥力，它也能轻松抵抗。

然而，仍然有许多强烈的对撞属于一掠而过的对撞。在大多数此类对撞中，质子几乎没有破裂，甚至完好如初，不会被 ATLAS 记录到。这些对撞称为衍射对撞（diffractive collision）。在 LHC 粒子束管道中距离 ATLAS 或 CMS 几十到几百米远的地方设置着一些专业探测器，它们能够捕捉到 LHC 特殊运行阶段衍射对撞生成的小部分未破裂质子。但在 LHC 正常运行阶段，大部分衍射对撞都被淹没了，难以探测。

所以怎样才算真正发生了一次对撞？如何定义对撞？不同的定义将影响结果，因为我们的测量对象其实是相对于诸如“最小偏差”对撞事例而言的平均粒子分布。我们应该选择什么东西加以平均？表面上我们可以无偏差地选取对撞事例作为样本，但实际上我们**不可能**做到真正的“无偏差”。大部分一掠而过的对撞不会在探测器上留下任何痕迹，所以无论测量什么物理量，都不应该将这些对撞事例包括在内。在实际操作中，我们观测到的是大部分非衍射对撞事例（质子被撞击得粉碎，一些碎片击中探测器）以及小部分衍射对撞事例。

为了便于理解，我做个类比，比如说测量英国人的平均身高。

每天中午你都到大街上随机选择一些行人测量身高。你将所有测量到的身高相加，再除以人数，就得到平均身高。这种做法类似于我们记录下所有观测到的对撞事例所生成的粒子数，再除以观测到的对撞事例数。很简单，但可惜不正确。

两种情况都犯了相同的错误。我们测量的行人（对撞事例）是带有偏差的样本。在粒子对撞的情况中，我们忽略了衍射对撞事例。这些衍射对撞事例生成的粒子数较少，所以我们实际上高估了对撞的平均粒子数。至于行人身高的情况……好吧，当你大中午跑到街上测量行人身高时，大部分孩子都还在学校里。[①]孩子比大部分人矮小，所以如果忽略了他们，你就会高估平均身高。

为了提高测量的准确性，你可以考虑以下几种修正。

(1) 比方说，你可以估计在学校中的孩子数，进而估算出大街上可能出现的孩子数。你可以对他们的身高分布进行建模（估算、猜测），利用这些结果对测量数据进行修正。

(2) 你可以强调你只是想测量成人的平均身高。所以在随机选取的样本里，即使有恰巧逃学在大街上闲逛的小孩子，你也不会测量他们的身高。

(3) 你可以强调你只是想测量中午在街上的行人的平均身高。在这种前提下，只要没有出现其他偏差，那么根据定义，你的测量结果就是正确答案。

在以往实验中，人们构建了一些理论模型：或者人为加入无法测量的衍射事例（在学校中的孩子们——第一种修正方式），或者将少数混杂在结果中的衍射事例移除，只测量所谓的非衍射事例（只有成人——第二种修正方式）。

但问题是，这些做法意味着他们的测量结果只对某些特定理论有意义。“衍射”和“非衍射”只是一种说法，并没有一种清楚明确的定义将它们完全区分。在英国，人们主观上普遍接受 18 岁生日作为孩子与成人的分界线。但在物理中并不存在人们普遍能接受的衍射对撞与

① 除非你是在放假或周末的时候测量。我不由自主地要加上这条脚注，这不免让我觉得自己是不是有强迫症，虽然这只是为了逻辑严密起见。

非衍射对撞的分界线。

当你利用某种模型对衍射事例进行修正时，其实你已经选择了某种特定的理论定义和一系列假设条件，你报告的不再只是发生的事情。而我认为，在经历了建造 LHC 和探测器的种种困难之后，重要的是首先只测量真正发生的事情，而尽量少加入理论假设。下一步当然是用理论对数据进行研究理解，但首先的观测这一步不可或缺。

幸运的是，我的同事都赞同这种看法。所以 ATLAS 既不专门测量"非衍射"事例的粒子分布，也不对所有发生的对撞事例取平均，而是测量在给定区域中至少存在一个带电粒子的所有对撞事例的分布，不管它们是否被某些模型称为"衍射"事例。这种做法类似于之前提到的第三种修正方式：测量遇到的每个人，不管他是不是成人，并明确表明样本存在偏差。"带电粒子"是可以再现的物理标准，与具体模型无关（它等价于"在大街上遇见的行人"）。这种测量方式得到的结果与其他测量结果的差别是显著的（差别可以高达 20%）。但**原则上**差别确实会如此巨大，而测量结果与各类模型的比较也会更客观。

这种方法在当时出人意料是全新的，也引起了一些人的争议。争议部分源于保守主义（"这不是我们对我们的实验采取最小偏差的方式"），也源于"我所遇见的行人的平均身高"与"英国人的平均身高"相比不算什么有用的数据。但这是我们唯一能够测量的东西——其他的都是对测量的解释。

这些测量以及之后更多类似的测量丰富了我们的认知。其中一个主要结果是，我们能够确信探测器运行状况良好。此外，我们对量子色动力学和质子的了解也得以进一步深入。之前我们知道质子中存在夸克，它们由强力的传播子胶子粘合在一起。我们写出了自认为能够正确描述它们的基本方程，但这些关于质子的方程无法求解，而且之

前也没有如此高能量中质子行为的观测结果。由于基本方程难以求解，所以物理学家基于种种近似条件提出了许多模型，每种模型都含有大量参数。新的实验数据能够排除一些模型，而对其他模型的参数加以限制和改进。

对“平均”对撞事例的深入理解除了能够满足我们纯粹的求知欲，也能够帮助我们更有效地探测罕见的对撞事例，例如生成光子、W 和 Z 玻色子或顶夸克的对撞事例，甚至是含有希格斯玻色子的对撞事例。

在另一场合，这些改进的模型也有用武之地：理解质子或其他粒子撞击大气层而生成的粒子簇射（shower）。远超 LHC 能量的超高能粒子无时无刻不在轰击地球。[①]它们同大气层的原子对撞，将原子粉碎得七零八落。对撞生成的粒子喷溅可以被布置于地球表面的实验仪器探测到，例如位于阿根廷的皮埃尔·奥格天文台。对此类高能对撞过程越了解，我们就越能胸有成竹地利用探测结果计算入射粒子的能量、方向和组成物质，进而推算出它们的来源以及生成之时大气层中究竟发生了什么暴力事件。[②]

虽然这些第一批论文并没有探讨 LHC 想要发现的令人激动的新物理，但它们仍然非常重要、引人注意。在我们走向未知领域时，它们巩固了我们的知识。而且，终于获得了真实数据，这实在令人引以为豪！

---

① 这或许是最令人信服的证据，表明此类对撞并不会生成黑洞、毁灭事件或灭顶之灾，因为当我写下这些字的时候，我们都还活得好好的。

② 我喜欢将它们想像成星球大战中银河第一帝国衰亡时，在一场太空激战中纷飞的战火。

2.3　能量和质量

那段时间，我恰好在 UCL 给一年级本科生上课。我发现，在枯燥的微分方程或矩阵课堂开始之时兜售一点 LHC 的最新消息确实是活跃气氛的好方式（至少对我而言如此）。

这是一门典型的一年级物理学位课。课程的主要目的是让学生掌握本科级别物理研究需要的数学工具，包括求解微分方程、多维积分、矩阵计算以及坐标变换。在这些主餐之后，还提供了爱因斯坦的狭义相对论题目作为甜点。

当我在本章开始之处谈到 LHC 粒子束的能量时，除了几处模糊提到“接近光速”，我并没有给出具体数值。这是因为我无法记住小数点后面究竟跟了几个 9。很明显这是我的巨大弱点。记得有一次在惠康基金会的讲座结束之时，听众向我询问 LHC 中质子的速度。当得知我也不知道具体数值时，他们似乎非常不满。[①]

答案当然是“接近光速”，这对几十年来的所有高能加速器都正确。更精确的答案是 0.999 999 964 倍光速（2010 年数据），而达到满能量时将是 0.999 999 991 倍光速。在前一种情况中速度是 299 792 447 米每秒，而在后一种情况中速度是 299 792 455 米每秒。所以我们在 2013 年至 2014 年间将 LHC 提高到满能量所付出的巨大努力仅仅换来了 8 米每秒的速度增加，大概相当于我骑自行车回家的速度。

这种现象表明起主要作用的其实是能量。狭义相对论意味着即使质子的能量和动量不断增加，它的速度也永远无法达到光速。在日常生活中，速度远远小于光速，所以动量约等于质量乘以速度。在狭义相对论中，乘积前面还有一个因子 γ。低速运动时它几乎等于 1，但

① 不过我还是得到了额外奖励，一些达雷克斯（Daleks）造型的姜饼。

当速度趋近光速时，它将变得非常大。[1]所以即使速度趋近光速一点点，动量也会变得非常大。能量亦同此理。粒子的总能量是 $E=\gamma mc^2$。当速度为零时，$\gamma=1$，这就是著名的 $E=mc^2$。当速度 v 远小于光速 c 时，它近似为 $E=mc^2+{}^1/_2mv^2$，其中第二项就是动能。当速度接近 c 时，γ 变得非常大，这个近似公式就失效了。能量可以持续增长，但 v 永远无法达到 c。听起来来很奇怪，但事实即是如此。

粒子物理学家讨论质量和动量时通常使用GeV和MeV作为单位。严格地说，这是错误的。能量的单位是 GeV，动量的单位是 GeV/c，质量的单位是 GeV/c^2。但为了避免到处出现因子 c，我们采用了所谓“自然”单位。在自然单位制中，c 的大小定义为 1。所以爱因斯坦的方程可以简化为 $E=m$。

质子的质量约为 1 GeV。[2]当 LHC 中的质子以 4000 GeV 的能量运动时，它具有非常高的相对论性：它的动能比静止能量大 4000 倍。这意味着两个质子对撞时，原则上能够用来生成新粒子的能量为 8000 GeV。仅仅两个质子对撞的能量就足以生成 8000 个新质子！当然，除了质子，这些能量还可以生成更有趣、更新颖的东西……

2.4 “你们有没有可能毁灭世界？”

这是科学家最讨厌被问到的刁钻问题之一。

很难证明发生的概率完全为零，尤其是当你非常严肃地考虑量子力学时。而我恰好是个严肃对待量子力学的人。所以对话常常会变成这样：

---

① 虽然这不是教科书，但我还是忍不住要给出 γ 的具体表达式，即 $\gamma^2=1/(1-v^2/c^2)$，其中 v 是粒子的速度，c 是光速。从表达式可以看出，当 v 接近 c 时，γ 趋近 1/0（1 除以 0），结果为无限大。

② 0.938 272 046 ± 0.000 000 021 GeV。

“你们有没有可能毁灭日内瓦/全世界/全宇宙？”

“可能性非常低。”

“可能性非常低？你是说还是有可能的？”

“呃，基本上不可能发生。但是……”

“你们这群混蛋!有一丁点可能就全完蛋了!我还没吃够巧克力呢!/我还有心爱的孩子！/哇，听起来有些酷，不过……!”

“等等，我是说……”

“你们不准再做下去了!”

这种讨论实在让人难以舒心。当然也可以出现另一种对话：

“你们有没有可能毁灭日内瓦/全世界/全宇宙？”

“没有!”

“你确信？”

“是的，我确定。赶快闭嘴，你这是杞人忧天!”

这种对话实际上并没有提高公众对科学的认识，而且比第一种对话更难令人信服。这类似于回答：“你就放一百个心吧，疯牛病没有什么风险。你看，我还在给自己的孩子喂牛肉汉堡呢……”

这些对话出现的原因在于对“概率”和“显著性”的误解。

有一次，我受到一个团队的邀请，在一个音乐节（秘密花园派对）上举办关于 LHC 的讲座。这个团队名为科学游击队，专门举办传播科学的活动。我把七岁的儿子也带了过去。我们观看了一些乐队演出，买了几顶帽子，然后通宵露营。第二天醒来后，我们在主题为“科学和理性”的帐篷里听了一些讲座，我也将在这个帐篷里倾情出演。其中一个演讲者是戴维·施皮格尔霍尔特（David Spiegelhalter）。他是剑桥大学统计实验室的风险公众认知元盛教授，非常擅长通俗易懂地讲解风险和概率。

施皮格尔霍尔特的讲座描述了一个概念：微殁（micromort）。它

是由罗纳德·霍华德（Ronald Howard）提出的一个量词，用来表示某种选择或决定引起的百万分之一死亡概率。狼吞虎咽汉堡包、吸食大麻、横穿马路……任何存在死亡风险的行为都可以赋予一定数量的微殁。早晨起床可以用几个微殁衡量，而赖床不起同样可以用几个微殁衡量。讲座中提到了“马瘾综合征”（equine addiction syndrome，Equasy）事件：英国政府的药物顾问戴维·纳特（David Nutt）教授研究指出，吸食致幻剂引起的死亡风险其实和骑马差不多（每次约 0.5 微殁）。

微殁和风险平衡给我的儿子留下了深刻印象。一年之后的某一天，他有一个家庭作业需要讨论“为什么人们要承担风险”的问题。他的答案是：“因为无可回避。人们唯一能够做的就是选择承担哪一种风险。”

我的儿子绝对是个天才，和戴维·施皮格尔霍尔特一样！而我们这些平凡人其实也能够更深刻地理解风险。如果有一些假想的场景，就更容易理解了。

设想我们做一些之前从来没有做过的事情，例如一个新的物理实验，随便想一个，LHC、RHIC[①]、Tevatron，或者其他任何引起人们激烈争论的机器。试着设想一种最糟糕的结果，即使它和所有实验事实、理论或逻辑相矛盾也没关系。科学很难证明一个完全否定的结果。或许你会发现最糟糕的结果也有无穷小的发生概率，所以倾向于刚开始就什么也不做。但在下决定之前，你同样有责任考虑一下什么也不做的风险。

场景一

公元 2125 年，地球遭遇大危机！运用多项创新天文技术，包括引

---

① 位于美国纽约布鲁克黑文的相对论重离子对撞机（Relativistic Heavy Ion Collider，RHIC）。

力波探测器和外太空望远镜系统的监测，科学家发现了一颗从银河系旋臂脱离的流浪行星。行星正冲向太阳系，它的质量大到足以扰乱其他行星的运行轨道。利用过去累积的关于我们“本恒星系统”的质量和轨迹的知识，我们能够进行多体量子引力计算。计算结果表明，几乎可以确定流浪行星的扰乱将使地球在 20 年内落进太阳中。幸运的是，这些监测和计算结果让地球上的智能生命提前获得警告。利用最新的反物质能量元，他们将一艘小型宇宙飞船送到流浪行星上。到达流浪行星后，纳米机器人组装了一个“小型黑洞”工厂。工厂为流浪行星提供了一个很小但稳定且强大的反推动力，将流浪行星从太阳系推离到宇宙尽头。危机解除，派对时刻！

场景二

公元 2145 年，地球遭遇大危机！无人能够解救，因为地球上最智能的物种已经在一次核危机/全球气候大灾难/管他什么毁灭性灾难中灭绝了。虽然地球差不多已经从那次大灾难中恢复，正逐渐成为新的生命摇篮，但流浪行星让它沿着螺线形轨道落进太阳中。一切都在此灾难之母中毁灭了。

场景三

公元 2135 年，地球遭遇大危机！科学家发现了一颗从银河系旋臂脱离的流浪行星。行星正冲向太阳系，它的质量大到足以扰乱其他行星的运行轨道。利用所有已知的关于我们“本恒星系统”的质量和轨迹的知识，我们可以进行一些计算。计算结果表明，有非常大的概率，流浪行星的扰乱将使地球在几年内落进太阳中。不幸的是，许多评论家和政治家拒绝相信这件事，他们宣称整件事都是左翼分子（或者右翼分子，根据他们的喜好）的阴谋论。不管怎样，反正我们也做不了什么。警告来得太晚，而且我们仍然不知道是否存在希格斯粒子、额

外维或小型黑洞，所以我们也没有合适的能源可以将我们送到那个行星上。即使我们想采取行动，也不知道该如何化解这场危机。之后的五年时间里我们都在为之前做过的愚蠢决定而后悔："安全第一"的法律判决让我们在 2010 时关闭了 LHC；基于同样的判决，之后物理和生命科学的许多实验也被迫终止。然后我们落进了太阳里。

当然，以上几种场景只是无穷多的小概率事件的例子。任何因为想像中的末日场景而鼓吹终止科学研究的人也必须估计一下终止科学研究将引起的风险，以及由此可能会面对的末日场景。

2.5 影响

在以上几种场景中都隐含着一个假设，即知识最终会有益于人类，通常以某种不可预料的方式。换一种你更熟悉的说法：知识就是力量。[①]

在我作为科学家的整个职业生涯中，人们一直在争论科学研究和经费应该倾向于有（经济、医学或其他）已知收益的活动还是"纯粹"的求知欲。这些争论有时候会变成不同利益群体之间的党同伐异。但他们通常分成两大派，双方都深信科学研究有益于社会发展、不可或缺，而分歧点在于如何最好地实现利益。

比如说，参与争论的大多数人都认为鼓励更多年轻人学习物理是一件好事，因为物理学家是能产生经济效益的东西。

在这种意义上，你可能会认为（我确实这么认为），LHC 引起的

---

① 这通常被认为是弗兰西斯・培根（Francis Bacon）的名言。它的拉丁语原文（scientia potentia est）似乎看上去更能表达我想表达的意思，虽然培根的原文是"ipsa scientia potestas est"（1597），意为"知识本身是力量"。这是不错，不过现在这些培根和土豆让我很想要份法式马铃薯饼大快朵颐，以补偿我在维基百科上查找资料耗费的大量时间精力！

激情和如此前所未有地深入了解物质本质所带来的惊奇主要将起到正面影响。像 2008 年 9 月 10 日那样在新闻中引起轰动效应的物理事件并不多见。但戴维·金爵士（David King），前政府首席科学顾问，时任英国科学促进协会（现更名为英国科学协会）主席，仍顽固地认为科学研究必须服务于迫切需要解决的实际问题。因此，他专门在那个几十年来最重大的物理事件当夜做客 BBC《新闻之夜》（*Newsnight*）栏目，指责我们这些粒子物理学家"自我陶醉"。

万幸的是，在物理阵营我们有布赖恩·考克斯。那时候他还没有现在这么出名，而且因为一整天虽美妙却压力极大的公众物理日，他已经有些身心憔悴。[①]尽管如此，他在媒体面前的表现还是比 LHC 的所有其他同事都沉着自信，所以我们不至于以在黄金档电视节目中被自以为是的人拆台的方式结束这几十年来物理学最激动人心的一天。布赖恩先是被"自我陶醉"的指责震惊得说不出话。之后他开始有力反击，从衍生而出的技术和鼓舞人心的作用两方面阐述粒子物理研究的好处，而此两者在那一天表现得都很明显。所以英国科学促进协会的目标（促进科学发展、启迪大众对科学的关注、增进科学工作者之间的交流），最终也被我们践行了，虽然我不认为它的主席有什么功劳。

无论如何（或许你还能感觉到背叛带来的深深伤害），虽然争论在最不愿意发生的时刻发生了，但它还远没有结束，而且不应该结束。应用科学和"其他"科学之间的冲突完全是人为的，而且有损无益，以至于我都不知道如何定义"其他"科学。并非"基础"科学，肯定也不是"纯"科学（并不存在这种东西）。"兴趣导向"是我认为最合适的定义。当我们研究远在天边的星系或者希格斯玻色子时，驱使我

---

① 在布赖恩为了这个新闻栏目从 CERN 赶回来之时，《新闻之夜》本来为这种例行公事般的辩论所准备的反方是一个右倾的游说组织"纳税者同盟"（TaxPayers' Alliance）。戴维爵士大概更喜欢他们出场。

们了解宇宙运行奥秘的是好奇心。而当我们研究新型材料、气候问题时，驱使我们研究的主要是解决迫在眉睫的问题或发展时髦的新技术。但两者之间其实没有明确界限：如果我们在 LHC 上的发现能有所应用，或者软件、探测器和加速器的开发让物理学家能在其他应用领域大展身手，大部分为 LHC 工作的科学家都会欣喜若狂。同样地，虽然拯救受气候变化影响的地球或治疗疾病是严肃而合理的动机，我认识的大部分在这些领域工作的科学家也都拥有一颗纯粹的好奇心，想要了解他们研究对象的基本原理是什么。

目前我是 UCL 物理和天文系的主任。事实上，当我撰写本章时，我们正在试行卓越研究框架（Research Excellence Framework，REF[1]）。我带领着一个由三个系所组成的“评估单元”：我自己的系、米拉尔太空科学实验室和伦敦纳米技术中心（London Centre for Nanotechnology）。这些系所从事的科学和工程研究涵盖了宇宙学、量子计算、粒子物理、材料科学、生物物理等领域。我们被要求搜集证据表明我们的工作在学术圈之外也能产生影响，而结果也表明，这样的例证在所有这些领域中都能找到。其中一个成功跨界的典型案例是精密透镜加工（来自天文物理项目，例如暗能量探测，它属于典型的“兴趣导向”的宇宙学），它现在已经成为戴维·沃克（David Walker）教授创始的公司的核心技术。这个公司位于北威尔士，为众多加工厂和工程公司提供机器和技术支持。他们发展的技术能够用于研磨和抛光器件，从航天工业中的精密零件到医疗保健行业中的人工骨关节替代材料都有广泛应用。

以上文字的目的并非为 UCL 摇旗呐喊做宣传，事实上每个物理系

① 就我而言，我希望这个看似拗口的名字能够成为首字母缩略语的另一经典，如同英国各地大学中时常听到的“Oi，Ref!”（吁！裁判）一样。

都可以描绘出相似的图景（多亏了 REF，现在全英国的物理系都在这样做）。我想说的是，像戴维·金爵士一样认为这个完整的生态系统中某一部分毫无用处的想法（例如“自我陶醉”的指责）是非常危险而荒谬的。即使从基础研究到实际应用可能需要很长时间，现在也已经有了一些例子表明因 LHC 而发展的技术在实际应用中能一展身手。LHC 上的新型探测器技术已经应用于医院患者接受放射疗法时的辐射剂量监测，同时也正应用于视网膜植入研究。主要用于分析 LHC 数据的全球范围网格计算技术已经应用于抗疟药物的结构分析。[1]无论在何处，物理都非常实用有趣，所以许多非常聪明的年轻人都想学习物理。其中一些人取得博士学位后在学术圈和物理学界之外从事非凡的工作。但我从来不会让自己以资深物理学家的身份在开学典礼上告诉新生们，他们需要“学习这些东西，因为它们很有用，但不要因为太着迷而从事新基础物理研究，我们这里不做此类研究”。相反地，我将很乐意告诉他们弦论是理论物理的一个巅峰，而他们应当尽量避免让实验物理和应用物理脏了他们的手。

2.6　从液氦到 M-理论

最后，在讲述 LHC 首次高能运行的故事之前，我想说一说实验物理和理论物理某些多维边缘分支的关系。这些边缘分支包括弦论（它将基本粒子描述为微小振动的弦）、膜理论（它将基本粒子描述为振动的高维物体），以及 M-理论（它是一种尚不清楚的理论，试图将前述几种方法统一）。总而言之，这些相当数学的理论框架试图将量子场论和广义相对论统一成万有理论。

① 参见：‘Particle Physics–It Matters’, Institute of Physics, 2009, http://www.iop.org/publications/iop/2009/page_38211.html.

在经历了一系列准物理本科生的面试、发现他们都想成为弦论学家后，我有时候觉得自己对这个世界上的戴维 · 金们的心理有了更多理解。偶尔我会长叹一口气，不耐烦地打断他们：“等等，你不是想成为一个真正的物理学家吗？”

如此诋毁我的理论同事们当然不是很恰当。在之前提及的生态系统中，理论物理是其中一个至关重要的环节，而弦论及其衍生理论是这一环节的合理组成部分。对大自然的观察理解引导我们发现许多美妙的数学原理。利用思想实验研究这些原理“能够为我们揭示何种奥秘、它们何时失效以及替代它们的理论是什么”本身就是令人激动的科学。但对我而言，它们至少要与实验数据保持一定关联。

相较于数学上的美妙，我更在意一种理论是否能够经受实验的验证。在这种意义上，M-理论、弦论等还有很长一段路要走。甚至超对称，这个弦论必备的先决条件，也仍需努力，虽然超对称的一些亚种至少还与实验数据有些联系（实际上，常常相矛盾）。我会在后面再讨论。

LHC 实验有可能发现超对称和（或）额外维存在的证据。这非常令人激动，无论哪种发现都必然为 M-理论增加可信度，而且将变革我们对基础物理的理解。但“寻找这些证据”是主要的工作，即使目标很抽象，寻找过程也将让你倾向于脚踏实地。我们不仅需要加速器，还需要探测器记录质子对撞时发生的事情。我们同样需要知道如何解释来自探测器的实验结果。

大多数高能粒子物理的探测器都分布在粒子束对撞点周围，它们洋葱结构的每一层都包含不同的技术，专门为了观测对撞的各种不同效应而设计（彩图 5）。借用这个世界上最无帮助的类比之一，我经常将它们称为“高科技圆柱形洋葱”。这个洋葱的许多层状结构都会在本书中出现，而其中最重要的一层是热量计。

热量计测量能量——卡路里。正如之前所说，食物携带着能量，

LHC 中质子对撞生成的粒子也携带着能量。[1]我们想尽量精确地知道它们具体携带多少能量，因为这对了解对撞的真相至关重要。

无论利用何种技术，热量计的基本原理都是用致密材料让粒子停止运动。粒子因撞击材料而减速，并在此过程中释放电磁辐射（基本上是光子——光线）。释放的光总量对应于粒子刚撞击时携带的能量。所以关键步骤是测量光总量，计算它的对应量，从而间接测量能量。这种对应关系的计算称为校准，它非常困难。

ATLAS 探测器上主要的热量计技术是利用夹杂着铅或铜的液氩（用于产生和探测光线）阻止粒子运动。液氩听起来非常陌生奇异，之所以使用它是因为它释放光线的方式非常完美，刚好正比于粒子进来时的能量大小。而且它很便宜：每升的价格比那种众所周知的棕色汽水饮料还便宜。另外，它还很稳定（每 GeV 释放的光总量不随时间改变），而且抗辐射。

虽然有众多优点，但当它被电子以外的粒子（譬如 π 子，对撞中经常生成的一种由夸克和反夸克对构成的强子）撞击时，它将释放出总量不同的光。之前我们并不知道电子会和 π 子混合在一起撞击热量计。还有许多诸如此类微妙细节，需要一一加以校准，然后你才能相信自己看到的结果。

整个校准过程类似于在任何一种小型科学实验中你在实验室工作台上检查仪器的准备工作。它包含非常非常多“控制”研究——为了熟悉装置，你需要测量一些已经知道的结果。如果没有这些步骤，我们将无法相信任何粒子测量结果，不管它是医院扫描设备生成的一些粒子，还是 LHC 上预示额外维存在的粒子喷溅。

无论是超对称粒子还是额外维，只有当实验不断重复观测到它已

① 参见 2.1 节“低能对撞和电子伏特”。

经被充分了解的信号，才可以说这种理论胜出。而只有那时候，或许我会开始认真对待 M-理论。

术语　　场、量子以及其他

一些常见的词语经常被某些专业领域据为己有，用来表示更为专业和技术性的东西，迥异于它们的日常用法。物理中的“功”（work）就是一个典型例子。一个恒力作用于粒子上，将其移动一段距离，所做的功定义为力（沿着移动的方向）乘以移动的距离。这是个专业物理量，实际上它是能量的一种形式，粒子因此增加的能量等于功的大小。很明显，它和 work 在日常生活中的意思（通常为了经济上的回报而努力完成某些事情）有一些相似，但在物理中它的用法更加限制、精确，而在日常生活中它的用法更加普遍、随意。

“动量”（momentum）这个词语却似乎走在另一条道路上。在物理中，它是 γmv（狭义相对论 γ 因子乘以静止质量和速度），用来量化一个粒子保持恒速恒向运动的倾向。如果速度远小于光速，γ 将非常接近 1，可以忽略。在日常生活中，momentum 则通常用于描述政治运动、其他社会、政治进程或者政策的趋势。在这些用法中它同样暗含着动量越大越难停止的意思，但并不存在精确的定义。

还有一个词语，到目前为止我都尽量避免提起它，但在后面章节中我又不得不经常使用，它就是“场”（field）。在通俗用法中，field 意为一块生长着东西的平地，或许还有农场主加以照料，而且很可能还有牛群。它也可以指研究或专业的领域，之前我已经用到过这种含义。这两种含义有时也能混合在一起——参见稻草人获得终身教职的原因。[1]

---

① He was outstanding in his field.（他是其领域的翘楚。/他直立在其田地里。）

在物理中，“场”也有相关定义，但更具技术性。物理中的场是一种物理量，它在某一给定空间区域内的每个点上都有数值。如果你在房间里，你可以用各种各样的场描述周围的环境。你可以像物理学家那样做：

首先你需要选择一种方式标记房间里的任意一点。一个很实用的方式是，选择房间地板上的一个角落作为“原点”。从原点出发，平行于连接原点的一面墙贴着地板移动一段距离（记为 x），再平行于连接原点的另一面墙贴着地板移动一段距离（记为 y），你就能到达地板上的任意一点。而只要再往上移动一段距离（记为 z），你就可以到达房间里的任意一点。一共用到了三个数字：x，y 和 z。

现在你就可以讨论各种各样实用的场了。例如温度在房间里的每一点都有一个数值。假设平均室温为 21 摄氏度。如果每一处都是此温度，你将得到一个恒定场，不依赖于房间中的位置，也就是说不依赖于 x，y 或者 z。

但靠近天花板的温度一般要比靠近地板的温度高一些，因为热空气密度比冷空气轻，热空气会上升到天花板处。我们可以用场 $T(z)$ 描述这种依赖性，即仅仅依赖于高度 z 的一个数值 T。T 可以是 z 的一个函数[①]，比如说 $T(z)=20.5+0.5z$，其中 z 的单位是米，温度的单位是摄氏度。对于两米高的房间，贴近地板的温度就是 $20.5+0.5\times0=20.5$ 摄氏度，而靠近天花板的温度是 $20.5+0.5\times2=21.5$ 摄氏度。介于中间的每一点的温度也可以由场的函数计算得到。其他场可以用来描述空气密度，甚至噪音大小。

以上提到的场都由位于任意点的一个数值描述。它们拥有大小，但没有方向，我们称此类场为“标量场”（scalar field）。“标量”专指

① “函数”（function）——另一个现已被数学家据为己有的常见词。

只有大小没有方向的东西。

同样还存在另一类型的场，它们拥有方向，称为“矢量场”（vector field）。之前我提到过一些例子——LHC 电磁铁中的电场和磁场。在房间里存在着引力场，它在每一点上既有大小（大约每千克 9.81 牛顿的力），又有方向（朝向地心）。

虽然在日常生活中我们根本意识不到，但电场和磁场实际上是量子场。[①]这意味着，如果在很短的距离尺度上研究它们，你会发现场的数值并不连续，而是由相应量子场的一系列离散[②]量子（或称激发态，excitation[③]）的总和（态叠加）描述。这些激发态有时候显示出波动性，有时候显示出粒子性。电磁场的量子场论（量子电动力学）中存在两种场——光子场和电子场。我们所测量的电磁波或者单个光子、电子就是这些场的激发态。

不管有没有量子，场的概念都不会变。它是这样一种物理量：在你感兴趣的区域内每一点上，都存在一个值或一些值的态叠加。

① 引力也可能是量子场，但目前我们还没有相关理论。

② 离散的意思是不连续、有区别，而不像渐变色一样连续变化。

③ 又一个被据为己有的词语。很明显它和通俗用法有相似性，因为量子场论非常令人激动（exciting）。

第三章

高能

（2010 年 3 月—2010 年 9 月）

3.1 7 TeV

2010 年 3 月 19 日星期五上午，LHC 终于荣升全球能量最高的粒子对撞机。

它开始将质子能量加速到 3.5 TeV（3500 GeV），比芝加哥费米实验室的 Tevatron 最高纪录还要高 3.5 倍。基础物理和加速器技术的研究由此开拓了新疆场。在科研的在线直播和公众化方面，我们也开拓了新疆场，至少在我们看来是如此。

我们本来希望将对撞当作早餐享用，但事情没有那么顺利。LHC 的多次引而不发让我想起了我在德国汉堡攻读博士学位时 ZEUS 实验中无数个令人沮丧的夜晚。但对于新对撞机而言，这些都是寻常之事。鉴于 2008 年的那次重大事故再加上巨大的公众关注度，我们可谓度过了一个令人头痛的上午。我觉得，这大概就是太空科学家在发射倒计时中途被告知发射将延期时的心情。注入和提升粒子束能量类似于开始倒计时，而我们重复做了三次，才最终使 LHC 的高能物理项目“升

空”。刚好当作午餐享用，已经很不错了。事实上，非常不错。

当时我在伦敦,不在 CERN。看见 ATLAS 控制室水泄不通的样子,身在伦敦真是明智之举。ATLAS 探测器早期运行阶段的核心成员只有一百多人，但整个合作组总共约有三千名成员，负责的任务涵盖了软件、电子工程学、机械工程学和理论物理。因此，若要在初次对撞时将所有人都塞进控制室，完全是痴心妄想。这时，CERN 发明的万维网技术刚好派上用场：在线直播成为可能，而结果也能实时共享，此外还有洪水般的电子邮件、电话和推特。

我们如期达成了 LHC 中细如发丝的质子束的储存及加速到 3.5 TeV。之后粒子束被引导至迎头对撞，而对撞结果被如实记录。我们才达到 LHC 设计能量的一半，但这已经足以让我们闯进未知的物理领域。之后的方案是在最近几年里常规化地执行这些步骤、搜集足够多的可用于全面探索新领域的实验数据,尤其着重于寻找希格斯玻色子的信号。如果存在希格斯玻色子，它的质量可能在某一质量范围内，它也可能衰变为其他一些质量更小的粒子。那些衰变过程相对而言可能比较罕见，而衰变的信号很可能会被一系列不同的背景噪音掩盖而不可见。所以在事情洞悉无遗之前，我们需要搜集大量对撞事例。之后我们计划暂停实验、升级以及加倍能量。

我似乎将那天的大部分时间贡献给了广播台和电视新闻。观看 LHC 的操作者们将粒子束“诱骗”至相互对撞以及祈祷 ATLAS 能够成功记录到对撞结果使我过度紧张。相对而言,接受电视直播采访（几乎）就是小菜一碟。

我记得当时我曾经希望,像 LHC 这样能够在公众之中持续发展很多年的科学故事可以帮助人们更加了解科学家和曲折却真实的科研过程。2008 年机器启动和故障的经历让我稍微坚定了这种希望。科学家偶尔会以天使或恶魔的形象出现在一些头条新闻中，但通常并无多少

详细内容[1]，然后再次消失。“这是一次突破!”——但事后证明事情要复杂得多，没人耐烦跟踪报道下去。然而，LHC 的故事看起来足够精彩，以至于小部分媒体和公众决定紧跟着波澜起伏的剧情发展。对粒子物理而言这当然是好事，甚至其他大科学故事也将因此受益良多，包括那些更富争议性的研究以及直接影响我们生活幸福的研究。

3.2 这不是演习

2010 年，英国大选临近。从 2007 年到 2008 年是我们科研经费状况极度糟糕的一段时期，当时在经历了很长一段时间的经费稳定局面后，英国政府利用两个研究委员会合并的机会大幅削减了天文学和粒子物理的研究经费。之后全球经济危机爆发，科研经费全面削减。

到 2010 年，经济危机仍未停止，银行不当行为的故事仍不断曝出。但在研究委员会（负责将纳税人的钱分配给各类研究项目的主要机构）的世界里，事情似乎达到了某种平衡：经费虽然在缓慢下降，但仍然有足够的来源使我们保持在 LHC 中的主要角色。LHC 当然比政治游说有趣得多，所以我没有花太多时间关注选举中的科学政策，尽管我本来应该更加关注。

顺便说一句，这其实是科学家非常典型的行为，尤其是我们刚刚获得实验数据，还沉浸在喜悦之中。然而，在同公务员以及其他与公务员打过交道的人员的对话之中，我被告知我们最大的错误就是，在经济繁荣、科学能够在经济增长之中分一杯羹（粒子物理可能分得少一些，但不至于被削减）时，我们却在科学上埋头苦干、沉默寡言。我们本来应该积极争取更多款项，将自己养得足够肥，以使我们在坏

① 详细程度甚至比不上对一部炸毁梵蒂冈的夸张惊悚片（《天使与魔鬼》，2009）的介绍。

消息来临之时禁得住削减。遗憾的是，这种想法恰好表明了科学世界和政治世界思维方式的一种分歧。

研究的目的在于找到一个好问题，然后将之解答。能够实际解决的好问题并不常见，而鉴别和解答这些问题的能力发展缓慢——这不是连夜将优秀研究小组的规模加倍就可以达成的。如果有足够资金，我们可以进行许多大型、绝妙而昂贵的项目。但除非这些资金注入属于持久、长期的投资，否则很快就会因为缺少专业技术人员而无法持续运作。在这个商业和利益集团持续游说的世界里，让政治家正确评估有关研究能力的战略计划以及科研稳定性并非易事。

另一方面，科学家主要考虑的是科研。只有在科研能力受到迫在眉睫的威胁时，我们大部分才会参与到喧闹的政治事件中。这种态度不仅是重大的战略失误，也是对关注我们的公众的不尊重。他们替我们付了账，所以有权利从我们这里了解进度。这也是解决政治和社会危机的一剂良方——公众生活需要科学，更需要持续参与其中的科学家。我们本来应当更积极地参与其中——至少要对各种经费来源道声谢，向他们报告好消息。

然而，谁能经受得住真实数据的诱惑！在高能启动后不久，牛津大学举办了第二次“提速”会议。这次会议进一步推动了有关喷注次级结构的研究课题。[①]但这些结果仍然是基于模拟数据的，而已经获得真实数据的消息所引起的紧张气氛弥漫于整个会议。

在 1990 年初，当我攻读博士学位时，曾亲历这种从模拟到现实的转变。当时我为某个“触发”系统的其中一部分写过仿真机[②]，那个触发系统负责筛选 ZEUS 中电子–质子对撞的实验数据。我花了两年时

① 不同寻常的是，此次的会议文集成为了一篇高引用率的论文，参见：http://arxiv.org/abs/1012.5412.

② 在 FORTRAN 77 平台上。

间，将代码折腾到不能再折腾。整个项目的想法是，将模拟数据输入真实触发器[①]和我的仿真机中，看两者是否得到相同结果。

在我们首次获得真实数据之前，它都能够完美运行。但输入真实数据后，触发器和仿真机全都开始生成无意义的结果。那是一段糟糕的岁月。虽然有如此仔细周到的前期准备工作，我们仍然完全搞不懂真实数据。所幸仿真机和触发器都生成了相同的无意义结果，所以我能够利用自己的代码进行深入研究。经过几个小时高强度的研究，我终于找到了原因！探测器中的线路按照小单元格的形式排列，每个单元格含有八排电线。[②]当带电粒子从附近经过时，每根电线都会接收到一个电子脉冲。在模拟数据中，脉冲信号依照电线的顺序发出，从 1 到 8。而在真实数据中，它们依照粒子到达的先后顺序发出，依赖于粒子的实际位置！一旦我们恰当地将这种情况考虑进去，所有错乱的数字再次变得井然有序。事后回头看，一切都如此显然，但当时却一头雾水、难以预期。类似事情经常发生。我们在模拟数据上反复演练了许多时间，这确实会有帮助，但无法保证万无一失。现在，在 LHC 上所有事情都是真实的，而紧张气氛四处蔓延。

3.3　哥本哈根

几个星期之后，对撞机开始稳定输出能量为 7 TeV（即每道粒子束能量为 3.5 TeV）的质子–质子对撞事例，使我们能够在全新领域中探索新粒子、相互作用力和维度。

在一些乐观的设想中，新粒子或者其他非比寻常的东西会在对撞

① 如果你想知道细节，我可以告诉你，它用 Occam 编程语言写成，运行在晶片机网络上。在当时它是非常前沿的技术。

② 分别标记为 1 至 8，而非 0 至 7，因为这里使用的是 FORTRAN 平台。

之初倾泻而出。和许多物理学家一样，我从来不相信这种设想会真实发生，但我们仍然需要为这种可能性作准备。我怀疑这将是一场持久战，延续多年艰辛冗长的工作。至少在十年内，LHC 都有可能持续产生新物理。我们不会在一两天内找到希格斯玻色子（如果存在的话），但寻找工作已经开始。

尽管如此，7 月将在巴黎举办的一个大型会议[①]已经开始筹备，而我们都希望在那之前得到一些初步而相对简单的结果。6 月底，作为 ICHEP 的准备工作，我们动身前往哥本哈根参加合作组会议。

ATLAS 是一个大型国际合作项目，约有三千名成员，来自 38 个国家。每年我们都有三个大型会议，还有几乎连续举办的小型会议，号称日不落会议。三个大型年会中有两个通常在 CERN 举办，而另一个每年轮流在某个合作研究所举办。那一年刚好轮到哥本哈根。

会议大部分时间讨论有关探测器运行状况的话题：我们是否理解它给出的结果？校准做到什么程度？其他时间则主要讨论（如果可以的话，审核通过）将在巴黎展示的初步结果。我所在项目的主要结果是关于理解和测量由质子粉碎而成的夸克和胶子形成的喷注。[②]我们想要讨论出一些初步结果，写进“会议记录”中。这些会议记录是 ATLAS 为已经公开展示但还未投递给期刊的实验结果所提供的备份信息。（随着本书寻找希格斯粒子情节的展开，你将了解更多。）随后需要尽快将之写成论文。

和大多数大型合作项目一样，ATLAS 拥有非常复杂的评审流程。虽然它在不断改进，但基本上包含以下几个步骤。

(1) 确定要做什么测量。

① 国际高能物理大会（The International Conference on High Energy Physics，ICHEP）。和 LHC 类似，ICHEP 的取名原则是准确性而非启发性。

② 参见“术语：夸克、胶子和喷注”（第 24 页）。

(2) 完成测量工作，向相关小组展示结果。ATLAS 有好几个物理小组，例如“希格斯”小组、“顶夸克物理”小组、“标准模型”小组。你需要说服小组（尤其是小组组长）你的想法是好想法，值得 ATLAS 将它发表出去。

(3) 小组要求委派一个“编委会”。ATLAS 出版委员会应邀委派一个编委会。

(4) 和你的编委会开会讨论，直到他们对你的结果分析感到满意。

(5) 向物理小组展示你的结果分析，等待他们的评审意见。

(6) 如果评审没通过，后退两个步骤再来（这条规则对大多数步骤都有效）。

(7) 小组组长和编委会一致通过论文草稿。

(8) 向 ATLAS 全体分发草稿。等待评论意见，更新论文草稿。

(9) 向 ATLAS 展示分析结果，在新草稿中回应所有评论。

(10) 再次向 ATLAS 全体分发新草稿。等待评论意见。

(11) 向 ATLAS 做最终展示。评审通过。

(12) 将草稿递交给 ATLAS 的资深物理学家（通常是发言人或副发言人），让他们“最终签字确认”。如果正常完成前面几个步骤，这一步通常就是走形式。但这是 ATLAS 发现潜在错误的最后机会。如果不走运的话，你可能会遇到某位资深物理学家，他没有全程关注之前的 11 个步骤，所以要求重来一遍。

(13) 将论文投递给期刊和 arXiv（这是一个预印本网站，粒子物理和天文学的论文都可以在此发布、保存和免费获取）。现在结果已经公开化。等待审稿员的评论意见。

(14) 回应审稿员的评论意见。

(15) 期刊接收。欢笑时刻。

这里面涉及了大量工作，但只要在每个步骤中都有一些正直、勤

奋的人，通常都能顺利运行。每通过一个步骤，对结果的信心就会增强，虽然错误确实会在经历这 15 个步骤中发现，有时候甚至在第 15 步之后还存在错误。对于科学结果而言，期刊发表是其质量优秀的一个重要标志，但也无法保证万无一失。在讨论之后几个月中出现的一些有关希格斯粒子的谣言和泄密之时，参考这些步骤将很有帮助。

如果不是期刊论文而是会议记录，可以跳过第 10 和 11 步，省略第 13、14 和 15 步。在哥本哈根，大部分会议记录通过了第 5 到 9 步。我撰写的记录顺利通过第 5 到 8 步，而第 9 步在 7 月 12 日通过，随后第 12 步也进展顺利。7 月 16 日，有关喷注截面的会议记录①发布，刚好赶上 7 月 21 日的 ICHEP。

我意识到我还没有解释什么是截面。鉴于它在物理学中是个常见而重要的概念，我为它和亮度单独撰写了一小节——参见“术语：截面和亮度”（第 73 页）。此处我权且告诉你：“喷注截面”是一种度量，用来衡量两道质子束对撞时观测到强子喷注的可能性。

当质子对撞时，我们真正关心的是质子内部成分（夸克和胶子）之间的对撞。但不幸的是，夸克和胶子仅携带一定比例的质子能量，而我们无法事先确定比例大小。举个例子，如果比例是二分之一，我们将得到能量为 1750 GeV（3.5 TeV 的一半）的喷注。但大部分夸克和胶子携带能量的比例要小得多。从统计结果来看，我们的喷注截面能量约为 600 GeV。由于喷注是质子对撞产物中最常见的高能物体，所以它仍然比目前为止 LHC 上生成的任何其他物体的能量还要高。而且，实际上它已经达到了 Tevatron 竭尽全力才达到的高度。能够对此进行真实的测量，而且能够证明 QCD 的理论预测符合实验数据，让我们非常自豪。直接参与这个课题的成员有几十名，而间接参与的成

① 参见：http://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/ATLAS-CONF-2010-050/.

员有上百名。正如最小偏差结果一样，它是我们踏入 LHC 新能量领域的重要一步。以上就是我们在哥本哈根会议中展示的内容。

除了这些成果，让哥本哈根举世闻名的还是它在量子力学的发展中扮演的角色，尤其是尼尔斯·玻尔（Niels Bohr）的工作和量子力学的“哥本哈根诠释”。后者无疑是目前物理学最古怪现象之一。而且不幸的是，即使 LHC 对此也爱莫能助。

在哥本哈根诠释中，量子力学仅允许我们计算某事发生的概率。“某事”发生的所有可能方式都对应着一个数值——振幅。将所有振幅叠加，再将结果平方，就得到概率。当存在大量“某事”时，这是能够做出精确预测的一种方法。特别是，振幅并不一定是正数，所以叠加的结果有可能相消而非相长。这意味着粒子从一处移动到另一处的概率可能存在干涉效应。[①]根据移动的各种可能路径，存在着高概率的区域和零概率的区域，在后者中所有振幅相互抵消。这些都是波动学中很常见的行为，而背后的数学主要是解决波粒二象性问题。电子是波还是粒子？我们可以说它是一个离散的量子物体，或者是量子场论中的一种激发态，很像粒子。但由于需要用振幅计算它的行为，它有时候又像波。

以上均非我们当中许多人觉得哥本哈根诠释有问题的地方，它们都还说得通。真正的问题是，如何将计算得到的“概率”对应到真实发生的事情。我可以计算电子从发射器经过某一特定路径到达探测器的概率，但究竟是什么决定了电子从哪条路径经过？更令人困惑的是，究竟是什么决定了电子开始进入某一特定路径的时刻？不过这些不确定性倒没给我带来太大困惑。真正困扰我的是，在某一时刻出现了某种特别的结果，但从振幅的叠加态到某种唯一结果的转变过程完全不

① 这就是在比如 1.2 节“‘稳赚不赔’定理”提到的 WW 散射过程中发挥作用的物理原理。

得其详。

在哥本哈根诠释中，转变发生的判定点被称为“波函数塌缩”。过了判定点，你就无须考虑振幅和其他有关量子的东西，只消将所有东西都当成确定的。如果愿意，你可以将判定点看成打开薛定谔盒子的时刻，你能够得知他的猫是死是活。这是物理学中一个令人相当不舒服的概念，因为它将观测者和被观测者分离，而我们希望物理能够将它们作为整个系统加以解释。宇宙学家会讨论“宇宙的波函数”，其中宇宙包含所有物理学家和他们的探测器，以及他们的猫。在这种情况下，如何理解它的塌缩呢?

当一个量子系统变得更庞大更复杂时，波函数似乎确实倾向于塌缩。构建一个大型的非塌缩或者说相干的量子系统非常困难。在 UCL 我所在的系中，有许多挤满人员的办公室，里面正从事着此类研究，既包含理论上的理解，也包含实验上的构建。如果研究成功，它将会有非常广泛的应用，而最直接的一个应用就是量子计算。

除了哥本哈根诠释，还存在其他一些诠释，例如多世界诠释。在多世界诠释中，每一种可能性都可以在多元宇宙中实现。（那么你的意识如何存在于这个宇宙中呢？）一些优秀的物理学家尝试发展隐变量理论，但这些理论或者做出的预测与实验结果不符，或者其中的隐变量非常奇怪——它们必须是“非定域”的，包含被爱因斯坦轻蔑地称为“幽灵般的超距作用”的东西。

我应邀参加过许多由科学激发灵感的画展和艺术展，质量参差不齐。不可否认，科学是许多精彩图像的灵感源泉。但一般来说，对我触动最深的通常是那些暗含着（以及令我回想起）我已经有所了解的东西并引导我从另一个角度进行思考的艺术。这同样适用于其他并非专门关于科学的艺术，它们可能事关爱情、距离、地点、亲情、恐惧……几乎任何东西。它要能直抵内心，引发我心中的种种回想，深化我的

阅历和感悟。

在以科学为主题的艺术中，唯一对我有此触动的是一部关于隐变量和波函数的话剧。这便是由迈克尔·弗雷恩（Michael Frayn）撰写的话剧《哥本哈根》。几年前我在伦敦南岸看过这部话剧，现在它仍然时不时浮现在我的脑海里，尤其是研究中用到量子力学或教量子力学的时候。弗雷恩出色地演绎了“二战”期间尼尔斯·玻尔、他的妻子玛格丽特以及维尔纳·海森堡（Werner Heisenberg）在哥本哈根的一次会面。玻尔和海森堡，量子力学发展过程中的两位巨匠，曾经是亲密无间的同事，但在战争期间走到了对立面。没有人真正知道会面的谈话内容，但会面之后玻尔一家从丹麦飞到英国，再从英国前往美国（差一点来不及）。海森堡在德国领导研制原子弹，而玻尔参加了在洛斯阿拉莫斯的曼哈顿计划。

海森堡与玻尔会面的动机是什么？他是否通知了玻尔什么？他们是否交换了关键的物理信息或错误信息？会面对洛斯阿拉莫斯的胜利和纳粹的失败究竟有什么影响？这一切都是各种推断的主题，而话剧展示了各种不同版本的推断。

这一切都非常有趣，但它还有另一层含义。虽然并未指明，但在我看来很明显，即以下两方面之间存在着相似性：一方面，已知的历史事件（会面千真万确发生过）及未知的隐藏其后的动机和对话；另一方面，量子物理中的可观测量（例如电子打击屏幕的位置）及引发结果的众多中间态（振幅）。为了计算电子的最终位置，你需要考虑所有可能路径，只讨论某一特定路径毫无意义。这并非是因为缺少信息而不可知，而是原则上不可知。我觉得，这也体现在海森堡的人格中。他可能存在许多混杂的动机，甚至可能连他本人也不清楚具体有什么动机，或者什么才是主要动机。所以在某种意义上，只有行为是真实的。动机往往不可知，所以也许需要综合考虑

所有动机，才能解释行为。

玻尔前往了安全之所，而纳粹德国没有研制出原子弹。更让人高兴的是，ATLAS 合作组带着众多新结果离开了哥本哈根，准备在巴黎大会上展示。

术语　　截面和亮度

“截面”（cross section）在物理学中是个很普遍的概念，但也很容易令人困惑。在此处，它主要是概率的一种度量。与概率的不同之处在于，概率没有单位，大小介于 0（不可能事件）和 1（必然事件）之间，而截面以面积为衡量单位，大小可以是任意（正）数。

为了理解截面的含义和作用，可以想像一场足球赛中没有守门员的罚点球。如果你的球技和我差不多（或者你是一名在与德国队进行点球决胜的英格兰队球员），你就会有一个非负的可能性失分。虽然需要考虑的因素众多，但你得分的可能性主要取决于球门的截面积大小。面积越大，得分的可能性也越大。

这（或者考虑一个等价的将核子束射击到靶子上的物理实验，例如将 α 粒子射击到金箔上的卢瑟福实验）解释了为什么在计算（比如 LHC 中两个质子间）粒子相互作用是否发生时，我们可以将它表示为截面，以面积作为衡量单位。

如果在一面墙上画上球门，然后随机地将球踢到墙上，那么在假设足球总能碰到墙的情况下，每次射门成功得分的概率等于球门的面积除以墙的面积。假设球门的面积是 18 平方米，墙的面积是 100 平方米，而我踢出的球在墙面的撞击点均匀分布于整面墙上（好吧，我的球技没这么差，请继续往下看），则每次射中球门的概率将是 18/100=0.18。这种计算确实得到概率。它的大小可以从 0（没有画上球门）到 1（球门和墙一样大）。

粒子物理学家和核物理学家用靶恩（barn，简称靶，符号为 b）作为截面的单位，靶是一定大小的面积。它应当是个相对较大的单位，容易被射击到［就像车库门（barn door）］。它大约等于铀原子核的截面大小。从日常标准来看，它是一个很小的单位——10^{-28}平方米，或者说一万亿亿亿分之一平方米。我知道这个数字毫无意义，但还有更糟糕的。我们在 LHC 上测量的截面大小为飞靶（fb）级别，即一千万亿分之一靶（10^{-15} b）。我想，我们需要面对这种事实：大自然在各种距离尺度上运行，并非每种尺度都容易想像。

我之前暗示过，影响（射门得分或粒子对撞）概率的另一因素是每单位面积我所做尝试的次数。在点球的例子中，如果我以平均 1 球每平方米的面积密度射门，最终我将射入 18 个球。如果是平均 2 球每平方米，很可能最终我将射入 36 个球。

“每平方米的射门次数”就是“亮度”（luminosity）。它以面积的倒数作为衡量单位，即“每平方米”。像 LHC 这样的粒子对撞机既可以通过射击更多粒子（以我为例，虽然仍是随机射门，但次数增加两倍），也可以通过提高射击精确度（仍以我为例，保持射门次数不变，但专注于球门附近的 50 平方米，这点我相信自己还是可以做到的）来提高亮度。

目前我们在 LHC 上测量亮度用到的单位是每纳靶（1/nb，1 nb=10^{-9} b）、每皮靶（1/pb，1 pb=10^{-12} b）和每飞靶（1/fb）。对于亮度而言，这些都是很实用的单位，因为 LHC 中质子－质子散射生成希格斯粒子过程的截面估计约为 10 000 飞靶。将飞靶乘以每飞靶（类似于足球例子中将每平方米射门次数乘以平方米数），就得到对撞事例数。目前我们的亮度已经达到 1 次每皮靶（或者说千分之一次每飞靶），所以可能早就已经生成了 10 个希格斯玻色子。但不幸的是，它们大部分都可能已经通过某些无法将之与其他事例区分开的方式衰变，所以我们可能

已经错过了它们。我们需要更多结果。

3.4 夏日巴黎

继续说巴黎的事。全世界都在等待着这次会议。好吧，至少部分如此——世界中对粒子物理至少怀有一时兴趣的那部分，它似乎比我们以前所知的要多。甚至时任法国总统萨科齐也会出席。会议上不仅有 LHC 结果的首次展示，还有 Tevatron 实验结果的最后一次主要更新（伴随着更多有关他们可能已经发现类似希格斯粒子或其他惊人结果的谣言）。此外，还有来自中微子世界的活动以及其他任何研究方向可能带来的出人意料的结果。

ICHEP 分为两部分，前三天是一系列同时进行的小型专题平行报告，然后是一天的休息，最后继之以另外三天的全体大会报告。原则上，各种细节将在大会报告中得到整合，而我们将目睹物理学如何发展进步。

我注册参加了会议，还获赠了一个极客背包、一支笔和一份巴黎地图，外加一个印有我名字和“ICHEP 2010”字样的胸牌，以免保安将我扔出会场外——这并非杞人忧天，尤其在预期总统也将出席的情况下。

在某场平行报告中，听众将了解到 LHC 探测器的运行状况。我早就知道 ATLAS 的答案会是“非常顺利”，而 CMS 的答案最终也是如此。这是重大成绩，而且进一步证明了我们并没有浪费因 2008 年的事故而不请自来的一年准备时间。

由于有点听腻了 LHC 的事情，而且也部分由于怀旧情怀，我参加了另一场异常拥挤的会议。在那里，HERA 和 Tevatron 上关于 W 和 Z 玻色子的最新测量结果将同 ATLAS 和 CMS 上的最新结果一起展

示。观测 W 和 Z 玻色子并非出人意料之举，它们早就在以前的各种实验中精确测量过。20 世纪 80 年代，卡洛·鲁比亚（Carlo Rubbia）和西蒙·范德梅尔（Simon van der Meer）在 CERN 工作时因为 W 和 Z 玻色子的发现而获得诺贝尔奖。LEP，一台在 LHC 之前占据着 27 千米隧道的机器，对 Z 玻色子进行了不可计数的精确测量，而 Tevatron 实验对 W 玻色子质量的测量已经精确到千分之一。但现在，在 7 TeV 对撞中再次观测到的结果以一种出乎意料强有力的方式，向我表明了实验就是固定我们认知的铁锚。

W 和 Z 玻色子的生命非常短暂，几乎马上衰变到其他粒子。它们是标准模型的对称性所产生的规范玻色子[①]，而根据标准模型，它们的质量直接来源于希格斯玻色子（或者更准确地说，与之关联的场）。在某种意义上，它们部分由希格斯玻色子组成。这些都是难以理解的事情，但除此之外也有很实际的预测。比如说，当画出对撞中正负电子对的分布图时，你应该会看到一个很大的凸起。结果确实如此，预测有效。别听其他人告诉你的量子力学只是关于不确定性的话。

事实上，结合标准模型粒子性质的精确测量结果，量子力学允许我们对标准模型希格斯玻色子本身的可能质量加以限制。这是因为在标准模型中，一些测量对象的量子修正间接含有希格斯玻色子[②]，所以它们依赖于希格斯玻色子的质量。在当前阶段，为了限制希格斯质量而需要测量的参量中，最广为人知、最重要的是 W 玻色子和顶夸克的质量。而 Tevatron 实验报告的正是此两者的结果。[③]截至 ICHEP 结束时，这些限制条件告诉我们，如果存在标准模型希格斯玻色子，有 95%的

① 参见“术语：规范理论”（第 98 页）。

② 通过费曼图中的小圈。参见“术语：费曼图”（第 146 页）。

③ 参见：http://indico.cern.ch/contributionDisplay.py?confId=73513&contribId=313. 马丁·戈贝尔（Martin Goebel）报告了这些结果。

概率它的质量在42—159 GeV之间。当综合考虑(来自LEP和Tevatron)希格斯粒子寻找过程中得到的界限时，质量可能区域将是 114—157 GeV。当然，此类计算得以进行的前提是希格斯粒子存在且标准模型正确无误，所以理论计算无法取代实际寻找过程。但这再次表明了标准模型的预测能力和我们的信心：只要从 LHC 上获得足够数据，我们就能够要么发现希格斯玻色子，要么证伪标准模型。

在理论会场中，明显不受实验铁锚的束缚而自由漂浮的是来自荷兰阿姆斯特丹理论物理研究所的埃里克·韦尔兰德（Erik Verlinde）。他的观点是：引力和广义相对性可能并非是最基本的，而是其他一些小东西表现出来的群体行为。如果我没理解错，这将从本质上将引力波下降到和声波一样的地位。观点非常新颖，而且有可能成为新的研究方向。但正如演讲者自己所说，这个理论还需要做出一些实验可验证的预测。

在第一天的最后一场会议上，芝加哥费米实验室的 Tevatron 粒子对撞机展示了它的希格斯粒子搜寻结果。会议厅挤满了人，所以我只能待在外面，一边从门缝中窥视会场，一边与加万和《对撞的粒子》纪录片制片人麦克·佩特森聊天。我们看到的是由 CDF 和 D0（D-零）实验分别独立进行的一些寻找希格斯粒子的零星结果。很快就清楚的事情是：在这次会议上将不会有人宣布标准模型希格斯粒子的确定结果。而尚不清楚的事情是：我们距离确定结果还有多远？还有多少空间可以让希格斯粒子躲藏（即还有什么质量区间允许它存在）？是否会发现它存在的线索？为了厘清这些疑问，我们需要等待全体会议上的综合结果。

我个人喜欢周六关于喷注测量的会议，有来自 HERA、Tevatron 和 LHC 的报告。后者包含我参与其中的喷注截面项目。尽管早在 2007 年就已经关闭了机器，HERA 合作组仍在分析实验数据，而且此次展

示了一些非常优秀、精确的测量结果。Tevatron 也展示了非常棒的测量结果，其中尤其令我感兴趣的是它对喷注质量的首次测量。测量喷注质量是了解 QCD 的好途径，同时也对利用喷注次级结构寻找提速的粒子（正如我在 1.8 节描述的）的方法非常重要。CDF 的结果表明，对于由夸克和胶子组成的“普通”喷注，理论和数据相当吻合，精确到几个百分点。这是个好消息。

关于中微子的会议是整个大会中最繁忙的部分之一。中微子领域是粒子物理中独立于 LHC 之外且取得巨大进展的一个领域。在后面章节中，我会回来讲讲它的故事。

随着 ICHEP 从平行会议到全体会议，一些人离开了，一些人刚到达，还有一些人和我一样继续。周日休息一天，组委会安排了精选的法国（巴黎）之旅。全体会议以萨科齐总统的盛大开幕式开始，继之以 LHC 的总结报告、新闻发布会以及费米实验室本·基尔敏斯特教授（Ben Kilminster）关于 Tevatron 上希格斯寻找最新综合结果的展示。

从 Tevatron 的飞靶/每飞靶计算可以知道，如果标准模型希格斯粒子存在，则 Tevatron 上早就已经生成了约一千个希格斯粒子，具体个数取决于希格斯粒子的质量。然而，LHC 面临的情况也发生在 Tevatron 上：从数据中挖掘出有用信息面临着难以置信的困难。CDF 和 D0 合作组已经排除了希格斯粒子的一个可能质量区间（158—175 GeV），减少了它的藏身空间。这为标准模型和超对称（详情后述）提高了赌注。此两者都倾向于比之稍小的希格斯粒子质量，所以排除更高的质量区间对它们有利。但此两者又都要求必须存在希格斯粒子，所以排除了一些质量区间对它们也是一种凶兆。

来自费米实验室的陈述是，假如 Tevatron 可以运行到 2013 年，而且分析能力继续改进，它就可以要么在某种程度上排除希格斯粒子的整个质量区间，要么找到它存在的线索。这将引起 Tevatron 和 LHC 在

那几年间某些形式的竞争。不过后来事情并没有如此发展。

萨科齐在演讲中有力支持了基础科学在社会和经济中的地位，强调指出必须确保当前经济的“突发紧急事件”不会危及基础科学的长期发展。相比英国的紧张形势，这真是令人耳目一新。在英国，新组建的联合政府正在策划经济危机中期时的首次预算，而皇家工程院刚刚推出一份政策文件，强调“当前商务、创新及技能部迫切需要考虑的应该是能对短、中期经济发展产生影响的研究”，带着浓浓的、明显到一目了然的潜台词：从 CERN 中退出将是个好决定。鉴于 CERN 中工程和科学所表现的长期共生关系（其中 LHC 项目先由一个威尔士人、后由一个北爱尔兰人领导），这简直就是一次阴险的背叛。或者换个更文雅的说法，这是一次“机会的错失”。科研经费的战争将会随着预算的增加而持续下去，我甚至怀疑，它将永不停止。

ICHEP 会议周之后紧跟着在巴黎郊区奥赛的直线加速器实验室（Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire，LAL）举办的小型附加会议。十天中我大部分时间（best part）都在巴黎——在英国斯温登举办的一个科研委员会会议花了我一天时间，所以我说“大部分”时间，不过这也确实是“最好的部分”。我非常喜欢巴黎，尤其是会议中途苏珊娜也来和我一起度周末，简直是锦上添花。我的旅店可谓麻雀虽小五脏俱全，不过由于它的早餐在一个充满烟味形似地牢的地方供应，所以我每天早上都在外面的一个咖啡厅用餐。那里的服务员更友好，而且景色也更优美。

《对撞的粒子》制作组（麦克和录音师）大部分时间都在附近拍摄，他们部分时间也在为《卫报》工作。他们参加过 2008 年在美国费城举办的 ICHEP。我的一个同事看过他们在费城拍摄的影片，还以为那是在巴黎拍摄的。当然，费城和巴黎实际上并不太像，所以当它们突然表现出共同点时，还是会让人茫然不知所处。我们曾在巴黎的

一个小餐馆一起用餐。那个小餐馆地处偏僻，但我猜测它必定曾被某本热门旅游指南强烈推荐，因为店内挤满了带着孩子来旅游的美国夫妇，全都只点了生饮水。我顿时在文化上茫然不知所处，以至于将酒洒了一桌。

旅游的事到此结束。整体来说，ICHEP 对我们是个很好的提醒：旧的实验仍然能够给出有趣的结果，即使新的实验在许多方面超越了它们。新旧实验的交替表明，某个实验的最好结果往往出自该实验生命周期的最后阶段。

说了这么多，其实我真正想说的是，今后两年将属于街区里正在茁壮成长的一个小孩子——大型强子对撞机。

3.5 超对称

我突然意识到，再这样写下去这本书就要变成我的旅游见闻录了。不过我还是得提及，在 ICHEP 结束几个星期后，我在德国波恩举办的 SUSY 2010 会议上做了一个报告，而现在正是将超对称（supersymmetry，SUSY）引入本书的好时机。由于种种原因，想要在不讨论 SUSY 的情况下一直讨论 LHC 物理是不可能的。

尽管还没有任何实验证据表明 SUSY 存在于现实的粒子物理世界中，但现在关于 SUSY 的年会已经多达 21 个，这似乎很奇怪。但这也是可以理解的，至少在 LHC 启动之前，SUSY 无疑是改进粒子物理标准模型的最佳途径。

如果读过“术语：标准模型中的粒子和作用力”（第 9 页）一节，你应该还记得，所有物质粒子（夸克和轻子）都是费米子，而所有作用力都由玻色子传递。你可能会问（尤其当你是物理学家时），这究竟是自然规律还是一种巧合？如果交换所有玻色子和费米子，世界是否

会变得非常不一样？

这是一个非常好的问题。在往昔岁月中，此类问题的提出曾引导我们发现了一些非常重要而有趣的答案。实际上这是一个有关对称性的问题，而对称性大概是物理学中最重要的一个概念。目前已知的最重要的物理定理中有一个诺特定理。诺特定理对经典物理和量子物理都适用，它指出（涉及一些技术细节，我不准备在这里细说），自然界中每一种连续对称性都对应一个守恒律。

上述定义或许不足以让你意识到它的深刻内涵和重要性而心生敬畏。那么继续考虑以下情况：

(1) 埃米·诺特（Emmy Noether）是数学家。她证明了这个定理，所以它不只是一种观点。

(2) 它意味着：由于物理定律不依赖于空间，所以动量守恒；由于物理定律不依赖于观察的角度，所以角动量守恒；由于物理定律不依赖于时间，所以能量守恒。

这不容易一下子把握。但请耐心听我说下去，它值得你花时间。

这里的“物理定律”，我特指描述物理系统行为的各种方程。它们由实际观察结合数学推导而得出，它们是临时性的（这不是一种宗教或终审定谳），并且它们能够起作用。当诺特提到一种连续对称性时，她其实想说，存在一个变量（不妨把它记为 x），在我的方程中它代表“到我家的距离”，而如果将方程中所有出现“x”的地方都替换成“$x+y$”，其中 y 可以是任意距离（1 纳米、1 英里、周围最近药店的距离），方程仍然有效。这就是一种连续对称性，称为平移对称性。如果我的方程（含有 x 变量）描述某物体的运动，则无论 y 取何值，方程都不会变化，仍然有效。从平移对称性可以直接得到动量守恒定律，即牛顿第一定律：任何物体都将保持静止或匀速直线运动状态，除非有外力迫使它改变。

退后一步再思考一下（当我写下这句时，我自己也照着这样做了）。诺特定理竟将空间中不存在特殊点的想法（即宇宙所遵循的物理定律与所处空间无关）与牛顿第一定律联系了起来。这真是相当惊人。

此类连续的、普适的对称性的作用非常强大。事实上，旋转对称性和平移对称性都包含于另一种更大的对称性，称为庞加莱对称群（简称庞加莱群）。它是空间和时间的对称群。除了平移和旋转，它还包括另一对称性，即物理不随速度大小而改变。它是构成爱因斯坦狭义相对论基础的主要原理。如果你觉得我是将爱因斯坦搬出来以显示自己的权威性，那么你误解我了。我只是想说，它确实能够起作用，这很令人惊讶。

还存在另一类同样令人惊讶的对称性。这是一类“内部”对称性，与粒子的量子数相关。“量子数”是粒子的内禀属性，例如电子的电荷或夸克的色荷。如果你同时将所有带电粒子的电荷反转（电子变成带正电荷，质子变成带负电荷），则电磁力不会发生任何变化，你无法发现任何区别。[①]所以“电荷反转”是电磁力的一种对称性。此类对称性也至关重要，而且事实上，标准模型的所有作用力都是由内部对称性推导而出的。[②]

所以对称性确实是物理学的根本要素。不仅对基本粒子如此，对物理学的其他领域也如此。它是我们工具箱中最强有力的工具之一，而且在大自然的每个角落发挥作用。总的来说，它的确超级棒。

“超对称”，或 SUSY，是这些想法的扩展。在将话题转移到埃米·诺特之前我就已经提到，超对称在玻色子和费米子之间引进了一种对称性。在一个完全超对称的宇宙中，如果交换所有玻色子和费米子，将看不出任何变化。这显然不正确，例如，大自然中并不存在和

① 如果考虑弱力，你就会发现区别。
② 参见“术语：规范理论”（第 98 页）。

电子质量相同的玻色子，所以超对称不可能是严格的对称性。但超对称有可能只在相应理论中表现出来，而在日常生活中发生破缺。如果确实如此，则电子的玻色子伙伴［称为超电子（selectron），即“超对称电子”（supersymmetric electron）的缩略］将拥有比电子高很多的质量。即便如此，对于 LHC 而言，超电子（或者其他标准模型粒子的超对称伙伴）的质量仍然很低，它们无法躲避 LHC 的搜寻。

所以，当对称性已经成为物理学（尤其是粒子物理）中至关重要的原理时，超对称尚需证明它自己的正确性。那么为什么每年还会有多达 21 个会议（截至本书撰写之时）讨论此话题？据我所知，存在三个主要的支持论点：

(1) 它对标准模型的一个重要问题有帮助。

(2) 它在某种程度上预言了暗物质。

(3) 它看起来很漂亮。

第一个论点和希格斯玻色子有关。和 SUSY 一样，希格斯玻色子到现在还没有现身。然而和 SUSY 不同，希格斯玻色子是构成标准模型的主要部分，离开它标准模型就会失效。但还存在一个微妙的问题。有别于其他所有标准模型粒子，希格斯玻色子没有自旋，所以它的质量需要经过某种特别的量子修正。如果放任它们“自然地”运作，这些量子修正将使希格斯玻色子的质量比它在标准模型中本来应有的质量大百万倍。这曾经是（现在仍是）理论可靠性的一个现实烦恼。从某种角度来看，它令标准模型看起来像是一亿亿分之一（10^{-16}）的巧合事件。这概率比每周买一张彩票而获得两周一期的乐透头奖的概率还低一百多倍。SUSY 之所以能消除这种烦恼，是因为费米子的修正是负数而玻色子的修正是正数。所以如果在两者之间存在（哪怕只是近似的）对称性，大部分修正将相互抵消。因此，即使不引进精细调节（fine tuning），希格斯粒子质量也能达到如此可怕的巧合程度。

第二个论点在我看来最吸引人。天文观测结果告诉我们，宇宙中可能存在暗物质（否则将意味着我们完全不了解引力）。许多 SUSY 模型都预言了一种粒子，可以作为暗物质的理想候选者，它可能就在你身后。当科学两个不同分支的问题看起来都聚焦于同一个答案时，就需要留意可能会有进展。

第三个论点本质上是对之前提及的一个观点的强调：对称性是理解大自然的绝妙方式，而 SUSY 进一步推广了对称性的概念。关于两类对称性（代表外部的、空间对称性的庞加莱群和类似电荷的内部对称性），有一个定理[①]指出，外部对称性和内部对称性无法混合。内部对称性的操作将一种粒子转变为另一种粒子（例如物质–反物质对称性的操作可以将电子变成正电子），而外部对称性的操作令你在时空中移动（例如平移对称性的操作可以将一个电子移动到另一处）。然而，玻色子和费米子的交换同时实行了两种操作。首先很明显，它将一种粒子变成了另一种；其次它改变了粒子的自旋，这是一种时空变换操作，因为自旋实际上就是角动量。角动量是时空的一种特性，因旋转对称性而守恒。所以对于那个声称外部对称性和内部对称性无法混合的定理而言，SUSY 是一个特殊的漏洞。[②]实际上，在诸如我们能够用来描述宇宙的四维理论中，它是**唯一**漏洞。鉴于所有其他对称性都能够在大自然中得以应用，产生简洁、影响深远的结论，我们当然期待最后一种对称性也存在。

以上就是我们应该严肃对待 SUSY 的三个主要理由，但它们都存在软肋。对于第一个：或许宇宙只是踩了狗屎运？一些弦论学家可能

① 科尔曼–曼杜拉定理（Coleman-Mandula Theorem），参见：*Physical Review* 159 (5): 1251–1256 (1967).

② 因此，它被推广为哈格–洛普斯赞斯基–佐纽斯定理（Haag-Lopuszanski-Sohnius Theorem）。如果你真的很想知道细节，参见：*Nuclear Physics, B* 88: 257–274 (1975).

会说，相较于 10^{500} 个“弦景观”之一的概率，我们应当庆幸这个概率已经好很多了。又或者，我们可能漏掉了标准模型中的一些微妙之处，它们或许能以其他方式强制让相互抵消发生，而不需要借助精细调节，就像在乐透中作弊一样。对于第二个：好吧，还存在其他一些理论同样为暗物质提供了候选者。对于第三个：我们知道，已经有许多漂亮的、对称性的数学想法在实验数据的礁石上撞得粉碎。我们需要静观其变。

而 SUSY 另一个相对不那么奇思妙想而从实验物理学家的角度来看更实际的特征就是它的灵活性。在实验中它能够以各种形式出现，以至于几乎所有我们观测到的古怪事例都可以（而且都将会，我敢打赌）解释为“SUSY 的线索”。

例如，我博士论文的很大一部分是关于某个或许已经在电子–质子对撞机 HERA 上观测到的 SUSY 过程的模拟研究。当质子和电子相互猛烈撞击时，可能发生的一个现象是质子中的夸克和电子粘在一起。这将产生一个“轻子夸克态”（leptoquark）（因为电子是轻子），而且将成为强相互作用、弱相互作用和电磁相互作用统一（所谓“大统一”）的一个信号。这是令人激动的研究课题。

就在我们启动之前，美国斯坦福的一个理论物理学家乔安妮·休伊特（JoAnne Hewitt）意识到，轻子夸克态的特征看起来和 SUSY 的某种特定形式很相似。当时牛津大学的博士后（之后 SUSY 2010 会议的一个组织者）赫尔比·德赖纳（Herbi Dreiner）意识到，若确实如此，则它还可以通过其他方式衰变。他计算了这些衰变。

我记得当时自己拿到一张餐巾纸，上面写着他的计算结果。不过我的回忆中或许有些添油加醋的成分。但不管怎样，我写了一段程序预测这些事例将会如何出现在探测器上，以便寻找它们。可惜它们从未现身，虽然在某一时刻我们确实观察到少量伪信号。

当然，我们有可能在 LHC 上发现 SUSY。事实上，我甚至写了好几篇论文，讨论它存在的一些可能特征（这也是我在 SUSY 2010 会议上做报告的一个原因）。总的来说，我一直主张的“提速的，喷注次级结构”之类的想法不仅可以应用于寻找希格斯粒子，也可以应用于寻找 SUSY。

这种灵活性使 SUSY 成为实验物理学家绝妙的测试案例，以确保我们没有遗漏任何东西。对所有可能存在的 SUSY 过程保持警惕，就相当于对一大堆种类繁多的古怪东西保持警惕。然而，即使没有发现古怪的东西（目前为止还没有），很不幸这也无法证伪 SUSY，而只能排除某一类型的 SUSY 模型。有点令人泄气。

SUSY 能够用来很好地解释低质量希格斯粒子如何不受量子修正的影响，所以如果没有发现低质量的希格斯粒子，SUSY 的吸引力就会大大减少。它不会被完全排除，但在可能理论排行榜上的名次将降低。反过来，如果我们找到了低质量希格斯粒子，对 SUSY 的寻找就会变得更吸引人。

我无法将整个会议都交代清楚，因为我只在会上待了一天。然而，仅仅从那一天就可以看出人们情绪的变化：现在终于如愿得到真实的 LHC 数据而非模拟数据了！目前实验数据尚未给 SUSY 的寻找打开新领域，但显然我们无须久等。截至会议之时，我们得到了 3 个每皮靶的数据。[①]只要多于 50 个每皮靶，就可以在 SUSY 的寻找上超越 Tevatron。在一年内，我们预期将达到 1000 个每皮靶，即 1 个每飞靶。我们不仅在积累大量数据，而且积累速度也越来越快。

---

① 参见“术语：截面和亮度”（第 73 页）。

3.6 名字、声望和引用率

“引用” 表示某篇论文参考了另一论文的结果。一篇论文被引用的次数确实能告诉你一些事情，但通常很难确定具体是什么。尤其在实验粒子物理中，情况比其他领域复杂得多，部分是因为作者列表实在太长了。作者列表之所以如此长，和大型合作项目的具体运作方式紧密相关。

论文被引用次数是判断工作影响力的一种方式。当经费资助机构正在对你的工作进行评估或者职称晋升未见分晓之时，它总能令人牵肠挂肚。

在 ATLAS 开始发表论文之前，我被引用次数最高的是 ZEUS 上一些有关质子结构测量的论文。它们都是非常重要的测量，而我帮助建造、运行了实验。但在其中一些论文中，我其实没有直接贡献。约有四百名物理学家在 ZEUS 的这些论文中署名，而在 LHC 的论文中署名的约有三千人。

这是粒子物理的惯例，并非事出无因。但人们确实会问，在这种环境中，科学家个体究竟如何获得声望甚至职位？这是个好问题，经费资助机构和评委会也有相似疑问。基本上，对此问题的解答是：三千名研究人员组成了一个同行评议小组。小组成员知道谁做了什么事情、谁真正做了贡献而谁又在游手好闲。推荐信中会提及这些情况，而且通常重要内部记录的作者名单也会同合作论文一起出现。在合作组中勤奋高效工作的人最受欢迎（据工业界的朋友说，这也是粒子物理学家在学术圈外仍受雇主欢迎的部分原因），而自以为是、浪费时间的人同样将臭名远扬。

我们论文的作者列表非常长，而且以字母顺序排列。有时候我们会讨论如何对作者进行排序，但最终结论都是：这样做，最好的结果

只是浪费更多时间，而最坏的结果将使实验小组别生罅隙而瓦解。我们已经有够多会议、竞争和不满，而争论作者列表或作者排序似乎只会令事情更糟糕。当前的惯例并非最完美，但很有效，而且我们还没有想到更好的方法。论文作者列表很形象地表明了一个事实：我们是约三千个人（3000-odd）（确实，而且是怪人！）的集合体。当事情出现错误时，我们需要这种团结一致的精神。而且，事情确实会出错。

当我被 UCL 物理系聘用时，领导其中高能物理小组的是特吉德·琼斯（Tegid Jones）。他是许多有趣故事的来源（大多数和歌剧演员有关），威尔士语词典中好几个粒子物理词汇也由他所赐。他的故事中还包括他在某个盐井里为注水的质子衰变探测器，即欧文–密歇根–布鲁克黑文实验（Irvine-Michigan-Brookhaven Experiment，IMB），工作时的事情。第一次注水时发生了泄漏，漏水溶解了大量盐矿。在淹没其他东西的同时，也差一点淹掉了一个未来国会议员的博士梦。第二次尝试时，不知何故，它产生了一个 490 米的虹吸效应，表面都是污水。这严重影响了水的光学纯度。第三次注水后，它终于能正常工作了，但他们没有发现质子衰变。并非因为他们没有能力，而是因为质子似乎根本就不会衰变。

在这种压力下想要齐心协力地合作，就要求每个人团结在一起。而对于科学家而言，这意味着作者列表。最终，除了确定质子的生命周期上限至少约为宇宙年龄的 10^{23} 倍，IMB 还观测到了来自超新星 1987a 爆发的中微子。这个事件（正如名字所示，发生在 1987 年）标志着我们首次观测到来自太阳系外的中微子。IMB 也发展了许多技术，之后被日本的超级神冈探测器（Super-Kamiokande）沿用和改进，后者最终实现了中微子振荡的首次测量。①

① 参见 5.5 节“与此同时，在中微子领域”。

感谢 ZEUS 和 ATLAS，我有幸参加了两个主要粒子物理对撞机的初始阶段。在我 ZEUS 博士研究的第一年，数据采集似乎还是非常、非常遥远的事。生活充满了费解的代码、满是缩略语的会议以及每隔几周就一闪而过的月进度表。就像（我所听说的）战争，ZEUS 英国软件部门的会议就是一段长时间的无趣僵持，继之以突然爆发的激烈冲突。当一些资深同事满腔热血地投身于费解的软件中时，ZEUS 的中央跟踪探测器（这是英国对 ZEUS 的主要贡献，而且**对所有物理都非常重要**——我们都应当将这句话纹在额头上，好给经费委员会留下深刻印象）却发生了气体泄漏，而且看起来再也无法正常工作了。HERA 延迟很久才启动，而且进度比预期慢许多。而我们开始之时，ZEUS 跟踪器还缺少大量电子器件。然而，泄漏最终被修复，电子器件也顺利到达，而跟踪器出色地工作了 15 年。ZEUS（以及我们的竞争对手 H1）为我们提供了关于质子内部结构的最好资料，使我们在强相互作用的理解（QCD）上取得巨大进展。

当然，LHC 启动之时也在众目睽睽之下一败涂地。经过种种磨难，合作组（以及冗长的作者列表）更加紧密地团结在了一起。

所以，在我的名字下有上百篇科研论文，而我直接参与的程度深浅不一。当然，我有自己喜欢的论文，我可以认出其中我自己的文字、图表和想法，以及我的实验结果。

即使在这些论文中，截至 LHC 启动之时引用率最高的两篇论文也算非常有趣的论文。榜首“论文”，实际上我参加了部分撰写和编辑工作。它既不包含真实实验数据，也没有原创理论想法，甚至根本没在期刊上发表。它是 1852 页的巨著，包含了使用 ATLAS 探测器的前期准备工作。它非常实用（虽然现在有些过时），而且它的高引用率也表明了人们对 ATLAS 的浓厚兴趣。在这种意义上，它的榜首地位当之无愧。

紧跟着的是来自 ZEUS 的一篇论文。我们公布了对撞机生成的两类粒子（中性 κ 介子和质子）相结合时测量到的质量。中性 κ 介子（和 π 子一样）是介子——也就是说，它由夸克和反夸克捆绑构成。在此处，即奇异夸克和下夸克的混合。

我们之所以进行这种测量，是因为其他一些实验在将中子和带电 κ 介子结合时观察到了质量分布图上的一个峰值，这或许将是人类首次发现由五个夸克构成的强子。在标准模型中，所有已知的强子或者由一个夸克和一个反夸克构成（介子），或者由三个夸克构成（重子）。如果它确实是由五个夸克构成的粒子，名为五夸克（pentaquark），这将意味着：

(1) 物理学头条新闻，以及

(2) 在我们的质量分布图上也应该存在相似峰值。

我们确实看到了一个峰值，虽然它在统计上并不完全令人信服，而且也并非精确地处于正确的位置上。不管怎样，我们完成了工作，公布了结果，而且刚好赶上热门期，所以得到了许多引用。但可惜，那个看起来像五夸克的东西似乎是个误报。我们观测到的峰值确实存在，但可能代表着其他一些较无趣的东西。一场空欢喜。

再下来就是许多我比较喜欢的论文，其中一些我已经提到过。我提起这些论文，是想表明将引用率作为衡量贡献的标准非常危险。如果让我丢掉一些论文，我更愿意丢掉前两名，而非紧跟着的十来名内的论文，因为后者含有更多实验数据或原创想法，它们真正丰富了知识。

行星围绕太阳做圆周运动的想法至少可以追溯到古希腊的亚里斯塔克（Aristarchus of Samos）。即使是哥白尼，被公认为现在接受的“日心说”模型的首倡者，他的工作在当时也被无视了很长时间。如果哥白尼和亚里斯塔克在世之时需要通过论文引用率获得晋升、争取经费，

他们就有的折腾了。

有时候很难理解，为什么一些好想法和重要的测量结果很长时间都无人问津，而其他一些却很快众所周知。我常常在想，名字能对项目的影响力产生多大影响？或许拥有一个朗朗上口、过目难忘的名字将有所帮助。那么，什么因素才能构成好名字呢？粒子物理项目的名字似乎都属于两种类型：构思巧妙的名字和简单的缩略语。有时候（很罕见）两者皆是。

LHC 明显属于第二种类型。大型（Large）、强子（Hadron）、对撞机（Collider）。名副其实，只要你意识到对撞机很大，强子很小，并把单词正确地拼写了出来。

CMS 也是。紧凑（Compact）、μ 子（Muon）、线圈（Solenoid）。事实上，它有 21 米长，15 米乘 15 米厚，但和 ATLAS 相比，它确实算紧凑。

ATLAS 属于构思巧妙的名字，虽然它也努力让自己看起来是“A Toroidal LHC AppratuS”（超环面仪器）的缩写。如果你问我，是不是太牵强了？我只能回答，别想这么多，为你使用的这个神话典故自豪就行了。

在 HERA（Hadron-Electron Ring Accelerator，缩写引经据典、朗朗上口又十分恰当，堪称完美）上，有一个实验名字为 H1。按理，另一个实验的名字就该是 H2 了。但我估计有个人偏偏不守常规，将它命名为 ZEUS。全都很博学，或许还有点弗洛伊德主义。ZEUS 拥有一个新式热量计，由闪烁计数器和从美国借来的贫铀（用完之后我们又将它还了回去）制成。由于 H1 中有个 1，所以我们顺势开玩笑地决定将 ZEUS 当作“Zero Experience with Uranium Scintillator”（对铀闪烁计数器完全零经验）的缩写。真是令人捧腹大笑。但热量计表现出色，所以谁在意呢。

如果足够努力，你几乎能将所有名字都解释成缩略语，甚至ALICE也可以当成“A Large Ion Collider Experiment”（一个大型离子对撞机实验）的缩写（事实上还不错）。但这终究有个限度，我自己很喜欢的一篇高引用率论文就说明了这点。

想当初在1993年，杰夫·福肖和我将宇宙射线的一些计算结果全部输入程序中，以生成多重的夸克和胶子散射。由于暂时想不出合适的缩略语，但又必须为我们的FORTRAN 77代码取个名字，所以我们就将它的文件命名为Jimmy生成器，因为这个名字听起来很有趣，而且易于发音。我们曾经相信总能赋予“Jimmy”某种意义，或者想出更好的名字。在麦克·西摩的帮助下（我们和他在1996年发表了一篇论文），程序现在仍在被使用。在LHC运行的前三年，它是用来模拟强子环境的主要程序之一。而在我参加过的许多次会议和报告中，都可以看见一些重要图表上出现“Jimmy”的字样。和麦克、杰夫一起发表的论文现在已经成为我引用率最高的论文之一，而程序的名字仍然是Jimmy生成器。我也仍然不知道它的具体含义。

3.7 洋葱的另一层

我在2.6节介绍过热量计，它构成了探测器技术“圆柱形洋葱”中的一或两层。而ATLAS和CMS以“洋葱”的形式围绕在LHC中质子对撞点周围。洋葱的每一层都独立揭示了对撞生成的粒子的重要信息，使我们能够推导出隐藏其后的物理。

热量计用来测量被滞留其中的粒子释放的能量——设计初衷是滞留尽可能多粒子。为了达到此初衷，CMS中的钨酸铅晶体和ATLAS中的液氩需要尽可能致密。CMS中的铅晶体非常神奇：它如玻璃般晶

莹剔透，却比玻璃重许多倍。[1]闲话一句，它还能高效吸收 X 射线：曾经在帝国学院为 CMS 工作，而现在成为我 ATLAS 同事的戴维·布里顿（Dave Britton）告诉我，有一次他提着装了一些铅晶体的手提箱从 CERN 到伦敦做测试。在安检机中这些铅晶体看起来和铅块完全一样，所以当他的手提箱被打开复检时，安检人员简直不敢相信这些玻璃砖块就是他们在安检机上看到的铅块。

但这不是错觉。和任何品质优异的热量计材料一样，铅晶体非常致密。强子、光子、电子——所有粒子都会滞留其中，只有两种粒子例外。一种是 μ 子，它虽然会留下一些能量，但不会滞留其中；另一种是中微子，无影无踪。我们还有办法继续追踪 μ 子，但对中微子就束手无策。唯一能做的就是从对撞中非平衡的动量推测出中微子存在的可能性。

然而，即使对于大部分能够用热量计测量能量的粒子，我们仍需知道更多信息。这就需要跟踪探测器的里层发挥作用。它们能够将粒子从对撞机生成开始到撞击热量计为止的实际路径的精确信息告诉我们。

我们之所以需要此信息，有好几个原因。比如说，虽然通常我们可以假设粒子大体上来自 LHC 质子束相交之处，但这并非很精确的范围。我们当然希望知道非常精确的位置——如果可以，几十微米之内。而此信息加上热量计的信息，我们就能得到非常满意的关于粒子运动方向和能量的测量结果。

另外，通常会出现几个对撞事例同时发生的现象，我们称之为“堆积”（pile-up）。这种现象之所以发生，是因为粒子束非常密集。虽然

---

① 在 CMS 实验室访客中心陈列着一对晶体，一块是玻璃，一块是钨酸铅。它们外表看上去完全一样，但你可以将它们拿在手里感受质量的区别。即使你事先知道区别，它们仍然会令你大吃一惊。

这对增加亮度有好处，但堆积现象却是令人心烦的事，因为我们只想测量单个对撞事例生成的粒子。如果能够将粒子追溯到某个独立的对撞顶点，我们就可以忽略其他堆积粒子，只专注于想要测量的那个。

同时，我们还可以判断：究竟是某个粒子直接从对撞顶点衰变，还是先产生一些粒子、运动一段路程再衰变，形成“二次顶点”。后者通常是 τ 介子和含有底夸克的强子的衰变方式，而它们的探测对许多测量都很重要。例如，它们是标准模型希格斯玻色子能够衰变生成的两种最重的费米子（除非希格斯粒子的质量非常高，可以衰变到顶夸克）。对于确定希格斯粒子质量的某些可能值，τ 子和底夸克的探测必不可少。

最后，在施加磁场的情况下（我们确实是这样做的），知道带电粒子的运动轨迹就可以测量它们的动量。高动量粒子几乎沿直线运动，而低动量粒子会大幅弯曲。动量非常低的粒子将做圆周运动。

所以，鉴于上述以及其他更多原因，我们设计了跟踪探测器“洋葱”的里层，其中用到的主要工艺是硅。硅是半导体材料。

在孤立的原子中，电子被原子核束缚，它们位于分立的能级上。我们之所以知道这些，是因为我们可以观测到电子在不同能级间跃迁而吸收或释放的单个光子。光子的能量对应于两个能级间的能量差。事实上，通过观察光子的吸收和释放，我们可以推算出材料中存在着何种原子。这属于光谱学领域，它使我们得知恒星的组成元素，即使我们从来没有到访过那些恒星。

这些能级就是尼尔斯・玻尔提出的原子模型中分立电子轨道的量子力学解。玻尔的原子模型是第一个大体上正确描述出原子核和电子之间关系的模型，对它的理解在量子力学理论的发展过程中起到关键作用。

总而言之，在孤立的原子中，电子处于束缚状态。那么，如果将

大量原子束缚在一起形成材料，会发生什么事情呢？

对于电绝缘体而言，几乎没有变化。电子仍然被束缚在每个原子中。

然而，对于某些材料，例如金属，相邻原子的最外层电子能级将合并。这意味着电子可以在材料中自由移动而不用改变能量，因此它们可以携带电流。这就是电导体。

你可能已经猜到，半导体则是介于两者之间。事实上，当纯度很高时，像硅这样的半导体就是绝缘体。虽然一些能级会合并，但由于其中并不存在自由电子，所以不会形成电流。然而，如果在材料中存在杂质或晶格缺陷，一些电子将逃逸到合并的能级中，它们能够携带电流。通过谨慎地添加杂质，我们可以精确地操控这种效应。硅芯片就是一种含有杂质的半导体，用来制造精密复杂的电路。我打出这段话时屏幕上出现的文字就有它的功劳。

粒子物理中的半导体探测器也利用了这种效应。当某个带电粒子穿过半导体时，它会撞击一些电子，使它们获得少量能量而逃逸到合并的能带中。在探测器两端施加电压，就能够让这些电子如水流般流动，计算它们的数量，推导出它们原来的位置。由此我们得知粒子具体经过了哪个位置。而通过大量“撞击”点，我们就能推导出（跟踪）某个粒子的路径。

这是粒子跟踪技术漫长发展历程中的最新成果，也是目前最好的方法，因为它非常迅速（对 LHC 上极快的对撞速率而言非常重要）、非常精确（粒子穿过的位置可以精确到几十微米），而且只需要一点点能量就能释放电子。

最后一个原因很重要，因为我们想要测量对撞生成粒子的初始能量。每一次和探测器中的材料相撞，粒子的能量就会变化，所以初始能量和运动方向都会出现一点偏差。每一次将一些能量传递给电子、将它们释放出来，它的初始能量和运动方向又会出现一点偏差。而且

别忘了，这些事情都发生在粒子到达热量计开始测量之前。有了半导体，电子的产生过程非常高效，所以只需用到少量材料，而初始能量和动量的测量仍然精确。

哪怕这些散射和能量损失非常小，它们也是理解和校准探测器过程中非常重要的部分。建造探测器时，我们会记录下材料的数量和它们所在的位置——不仅仅是半导体传感器，还有数据线、机械支撑结构、高压电缆。同时，探测器需要保持低温（否则热能会把电子释放出来，产生伪信号），所以还有一整套相关的基础设施——在 ATLAS 中我们利用 C_3F_8（八氟丙烷，一种氯氟烃）气体作为冷却剂。[①]

所有这些源自机器建造的信息都写进了探测器的运算模型代码中。有一个最早由 CERN 启动而现在已经拥有众多协作者的开源软件项目，名为 GEANT，它为我们提供了一个工具箱，使我们能够整合材料和几何构造的信息，模拟粒子与它们以及粒子与电场、磁场的相互作用方式。现在从太空科学到医学，GEANT 都有广泛应用。当我们用它研究 ATLAS 对撞事例时，在我们走廊另一处的刘易斯·达蒂内尔（Lewis Dartnell）正在用它研究如果火星上存在昆虫，它们需要藏到多深的地底才能躲避宇宙辐射的伤害。

这些半导体探测器只能记录带电粒子，而像中子和光子这样的中性粒子就不会被其探测到。然而，在检测 GEANT 是否准确模拟探测器时，光子发挥着很大作用。

光子偶尔会与材料相互作用（如果有大量材料，则必然会发生相互作用——致密的热量计就是实例）。在这种情况下，光子转化为正负电子对，因而带上电荷。当它们相互旋转远离时，我们就能追踪它们，继而推算出它们的生成之处。如果将探测器暴露在足够多的光子中

① 我们当然没有随便将它释放到臭氧层。

（LHC 上正是此种情况），你就可以建立起材料和生成顶点之间的对应关系，因为顶点的密度正比于材料的密度。如果在某个特定区域存在更多材料，相互作用的概率就会更大，顶点也会更多。

这使我们可以从生成顶点的分布推断出探测器的结构。将每个生成顶点用一个点表示，做出点阵图，你将从中看到硅材料探测器模块、冷却管、电缆和碳纤维支撑结构。我们也可以为模拟软件制作点阵图，观察两者是否相同，以确信我们真的知道自己在做什么——如果错了，还可以修正我们的模拟。

2010 年 9 月，我在卢瑟福–阿普尔顿实验室（Rutherford Appleton Laboratory，RAL）的一个会议上展示了以上内容。那一天在杰夫・福肖关于粒子的本质追根究底是什么的议论中结束，时间是凌晨三点，地点是某个酒吧。我错过了大部分内容，因为凌晨一点我就去睡了。所以我可能仍然不知道它究竟是什么。

但是，它肯定和这些点格有关。

3.8　走进未知

第一篇真正探讨新物理的 LHC 论文由 ATLAS 在 2010 年 8 月 13 日投递到预印本网站[①]和《物理评论快报》上。

之前其实已经有一篇关于 7 TeV 对撞最小偏差结果[②]的论文（出自 CMS）。那是第一篇来自高能对撞的论文。此外还有 LHC 其他实验部门发表的为数众多的初步结果。但 ATLAS 的论文通过了评审过程的第 13 步[③]，所以被 ATLAS 认定为“最终结果”。它是第一篇包含夸克、

① 参见：http://arxiv.org/abs/1008.2461.
② 参见 2.1 节“低能对撞和电子伏特”。
③ 参见 3.2 节“这不是演习”。

胶子在超出 Tevatron 能量范围之外的对撞结果的论文。那一刻，我们真正迈进了新领域，无可置疑。

ATLAS 的论文设定了排除上限。也就是说，我们没有发现任何意料之外的结果，但已经将我们对基础物理的认识边界在能量上推进了一个层次。更多数据正在源源不断到来，而测量也越来越精确。真正的探索已经展开！

术语　规范理论

“规范对称性”（gauge symmetry）的概念是标准模型的核心内容，所以我想尝试在这里将它解释清楚。坦白说，虽然我明白其中的数学，但仍然努力试图在头脑中为它构造一个直观图像。我在此书中提到的大部分东西，在我的头脑中都有对应的图像（这是我理解物理的方式），但“规范对称性”的概念目前还没有。所以当我继续往下写的时候，我将试着为它构造一个图像。

考虑一张斯诺克球桌（如果你是美国人，考虑一张台球桌），回想一下球桌上的斯诺克球相互作用和移动的方式。它们遵从牛顿力学匀速恒向滚动，直到与其他球或球桌边缘碰撞反弹。它们会因为摩擦力而损耗能量，最终停止下来。

在描述斯诺克球运动的物理方程中存在一种对称性。好吧，其实存在好几种对称性，但先考虑其中之一。设想将斯诺克球桌抬高 50 厘米。虽然这将使游戏变得更困难，但只要斯诺克球桌整体抬高相同高度，即它仍然保持水平和平坦，这就丝毫不会影响斯诺克球移动和相互作用的方式。

这就是一种“全局对称性”（global symmetry）。某种变量（例如球桌的高度）在所有地方同时改变（即全局），而它对物理系统（例如斯诺克球）不产生可观测的效应。

在我们目前认为正确构成了宇宙基础的物理定理中，也存在类似对称性。我马上就会举一个实际的例子，但现在先继续上面的案例讨论。如果斯诺克球桌是整个宇宙，我们将很难想像它如何整体同时改变。“同时”究竟意味着什么？由于任何东西都无法超越光速，所以并不存在所有事情“同时”发生的绝对定义。时间依赖于速度，所以某个观察者看到的“同时”对于另一个观察者而言却是沿着球桌逐渐移动的变化。控制斯诺克球之间相互作用的定律不应该依赖于观察者的速度，所以一切都值得重新思考。换句话说，如果斯诺克球桌两端相距 100 光年，我将其中一端抬高，另一端能够知道这一端已经抬高的最快时间也要 100 年后，因为任何东西都无法超越光速。

那么让我们试着强化这种对称性，使得，比方说，物理定理还必须在高度的**定域**（local）变化中保持一致和对称，而不仅仅局限于全局变化。如果斯诺克球桌被抬高，对于某些观察者而言可能是同时的，而对于另一些观察者而言，在某些时间段球桌的一部分将高于另外部分。但对于所有观察者，物理定理都必须保持一致。那这时我们能从中推导出什么呢？

很明显，我们会看到一些斯诺克球在滚下坡时加速，或者在滚上坡时减速。如果在球桌上有个凹陷，斯诺克球会在滚下坡时加速，最后聚集在底部。如果有个凸起，斯诺克球就会被它排斥开。这些都是可观测到的区别，它破坏了物理定律对任何观察者都应当相同的要求。为了让斯诺克球的运动在任何人看来都一致，你需要对其引入某种惯性力，使它们能够爬过山坡穿越低谷——这就是规范作用力。

这并非完美的类比，也不存在完美的类比。不过，这种将全局对称性变成定域对称性的操作（出于一些我不清楚的原因）被称为将对称性“规范化”。它真的能起作用，而且非常强大。接下来是真实世界的一个例子，它包含行为类似波动的粒子，所以比斯诺克球更复杂。

但它不再是类比，而是对事情如何发生的理论描述。而相应理论非常精确地描述了真实世界。

电子会表现出波的行为，所以它们有波峰和波谷，也有能够告诉你波峰（或波谷）何时向你移来的相位。如果两个电子的波峰和波峰、波谷和波谷相重叠，找到电子的概率就会加倍。而如果一个电子的波峰和另一电子的波谷相重叠，它们将相互抵消，你就不会发现任何电子。

重要的是，能够造成不同结果的唯一因素是**相对**相位——它们是否重叠？如果你将遍布全宇宙的电子同时改变相同大小的相位，则毫无疑问不会发生任何变化。这类似于抬高斯诺克球桌同时保持水平和平坦，也是一种全局对称性。在群论中，这种相位偏移甚至还有自己的名字，即 U(1)对称群。事实上，正如我在介绍诺特定理时提到的，每种对称性都对应一个守恒律。[①]在此处值得注意的是，它恰好对应了电荷守恒。

正如斯诺克球桌的情况一样，想要在同一时刻改变全宇宙每个电子的相位既不现实，也毫无意义。所以我们应当考虑在不同地方改变不同相位的可能性。在这种情况下我们就能了解，为了使物理定律保持不变我们需要采取什么措施。类似斯诺克球桌的情况，为了达到此目的，我们需要引进一种力。事实上，如果要求大自然遵从 U(1)规范对称性，需要引进一种特定的力：电磁力。用量子场论的话就是，你引进了一种规范玻色子——光子。

以上句子描述的是数学：它们并非类比，它们是方程中发生的事情的文字描述。真是赏心悦目的内容。

除了 U(1)，还有其他可能的对称群。SU(2)群对应的规范对称性将产生 W 和 Z 玻色子。而 SU(3)群将产生胶子。这就是光子、W 和 Z

---

① 参见 3.5 节“超对称”。

玻色子以及胶子被称为规范玻色子的原因(而希格斯玻色子不属此类，因为独有它不由此方式产生)。这也是标准模型在文献中被称为 U(1)×SU(2)×SU(3)规范理论的原因。这还是物理学家有时候看起来如此痴迷对称性的原因——它很完美、很强大，而且能发挥作用。

即使我描绘的图像对你的理解仍起不到帮助，我还是得结束此节了。简而言之，标准模型中的所有作用力都基于定域（规范）对称性，而传递作用力的玻色子被称为规范玻色子。

第四章

标准模型

（2010 年 10 月—2011 年 4 月）

4.1 科学至关重要

2010 年 10 月，我参加了一场示威活动。我已经二十多年没有参加过此类活动，而之前要么是声援废除撒切尔夫人推行的人头税，要么是声援保留学生助学金。一个成功，一个失败，所以平均下来有 50% 的胜率。在这两次示威之间，或许我还参加过其他示威活动，不过记不得了。这一次，则是为了科学。

虽说科学家群体组成了一个圈子，但它很少被鼓动成公开的政治力量。个别科学家确实非常热衷政治，有些还在政府部门担任科学顾问，而且无疑还有一些游说团体为了保护研究经费而斡旋于政治中。但我还是第一次见到如此大规模的科学家同盟聚集在英国财政部外的白厅街面，发出同一种声音，举行公开的示威活动。

这次的情况很不寻常。“科学至关重要”示威活动由当时 UCL 的生命科学领域研究员兼作家珍妮弗 · 罗恩（Jennifer Rohn）、科学与工程运动同盟（the Campaign for Science and Engineering，CASE）以及

其他许多支持者发动。其中一些人，例如前自由民主党议员埃文·哈里斯（Evan Harris）、以畅销书《小心坏科学》（*Bad Science*）闻名的本·戈尔达克尔（Ben Goldacre），是“守卫科学”运动的长期忠实参与者，我们在诽谤法修订运动（仍在进行中，虽然没有示威活动）中就已经结识。我只是一个参与者，并非任何形式的组织者。但在我看来，这次运动的主题非常恰当。

我们正处于经济危机中期，而且刚迎来新政府。每个人都知道，政府支出的削减即将展开。上届政府为科学许诺了很多好处，而在戴维·塞恩斯伯里男爵（David Sainsbury）担任科学及创新事务国务大臣时，这些承诺大都能付诸实践。然而，在他 2006 年退休后，前进的车轮似乎被卸掉了。特别是，两个研究委员会合并成了科学及技术设施理事会（STFC）[这个缩略语估计会让隔壁的斯温登足球俱乐部（Swindon Town Football Club）很烦恼]，在此过程中粒子物理和天文学遭受了大规模经费削减。而随后的两任科学及创新事务国务大臣似乎要么对此不关心，要么对此无能为力。

作为一个粒子物理学家，同时也是各种 STFC 委员会的成员，我目睹和参与了这段相当漫长而痛苦的历程。其中一个高潮点发生在 2008 年 7 月，我们参加了创新、大学及技能事务大臣约翰·德纳姆的一次会见。在那次会见中，我第一次见到了彼得·希格斯（Peter Higgs）。彼得·希格斯口若悬河地阐述了基础物理的重要性，而约翰·德纳姆和当时的科学及创新事务国务大臣伊恩·皮尔逊（Ian Pearson）认真倾听了他的发言，客气地和我们进行了讨论。但除了高潮点，还存在许多低迷点。最终，在经历了多年破坏后，STFC 成立三年来的第三任科学及创新事务国务大臣德雷森男爵重建了一个体系。虽然没有修复已经造成的破坏，但他确实解决了一些引发科学危机的体制问题。

在那场噩梦之后，粒子物理和天文学学术圈都急于表明，甚至在

经济危机之前它们就已经遭受了严重经费削减。而我们都异常担心德雷森男爵所做的努力不能被延续。科学界其他圈子有幸不用遭受STFC引发的所有问题，不过它们同样担心，到了困难时期，基础科学可能会被当作负担不起的奢侈品，而非可以帮助减轻困难程度的关键投资。

这段经历让我明白了：为了取得一致意见，可以借助许多不同的政治方式。赢得学术争论或者通过摆事实讲道理确立真理是一种方式，而吸引每个人的关注、让他们奉行最终结论也是一种方式。我们需要告诉公众和政治家，在科研能力方面，甚至更普遍地说，在研究和教育方面，英国有其可贵之处（珍贵且脆弱）。而仅仅关起门来和政治家说这些事情是不够的，不管在场之人有多重要。我们需要让公众知道这些事情，也需要让政治家知道公众知道这些事情。我们不能再保持沉默了。

当我还是博士生时，在ZEUS探测器数据采集开始阶段的某个晚上（1991年的某一天），轮到我值勤“安全督导轮班”。ZEUS是一个规模巨大的粒子探测器，约有20米高，大部分隐藏在混凝土防护罩里。安全督导轮班对毫无经验的研究生而言刚好是很适合的工作，只要每隔一小时四处晃悠巡查，读取仪表数据，在核对表上打个勾。如果发现任何异常现象就向轮班组长报告。

在值勤的某个时刻，有人发现ZEUS的混凝土防护罩底部在滴水。这是很糟糕的事情，因为漏水会严重损坏我们花费数年心血制造的精密仪器。

大家马上忙活起来。进水管道被关闭，打开探测器的行动已经开始，许多资深科学家都赶来和轮班组长举行紧急会议。

由于能力不够，完全无法胜任抢救任务，所以我继续我的安全巡查工作。我注意到在“帆布背包”（放置着三层高速电子仪器的金属箱）中，一两个温度仪表的示数稍微超出了正常范围。我重新回到控制室。

原则上，我需要立刻报告此事，不过每个人似乎都在处理着重要之事。我该怎么做？

由 STFC 资助的科研项目早在 2007 年就开始“漏水”。从那时起到 2010 年“科学至关重要”示威活动之间的几年，研究经费大约被削减了 40%。我曾经出席各种评委会，艰难地决定应该放弃哪个优秀的科研项目以便保留其他项目。这是令人厌恶、压力巨大的工作，即使“最好”的结果也令人不快。

此外还有申诉、特别评委会报告等。通过这些程序，制定科学政策的各类重要人物迫使幕后的科学家们接受他们的说辞，诸如“不要吵闹，我们已经看见了问题，会加以考虑，大吵大闹只会适得其反”。有时候一些人还会被这些花言巧语欺骗，没有意识到他们的目的只是明修栈道暗渡陈仓，在压制各种声音的同时推行他们的政策。确实，大吵大闹本身并不能解决任何事情，而谩骂攻击常常会适得其反。我们需要严肃、合理的争论，基于真凭实据。但保持沉默只会令自己被忽视。

此外还有一些暗含恐吓的言论，诸如“你们真的想让公众知道我们在天文学和粒子物理等研究中花了多少钱吗？当然，**我们**明白这些资助并非没用，但**他们**不会理解。即使你们大做文章，也不会得到他们的支持”。谢天谢地，我们没人相信这种鬼话。而且在示威活动中，我们让公众听到的不仅仅是经费削减的哀鸣，还有正在进行的激动人心的科学。LHC 是个精彩的故事，此外还有其他许多可以讲述的：普朗克卫星在 2009 年成功发射；“卡西尼号”（Cassini）探测器送至土卫六表面的着陆器传回了许多精彩的图片，等等。即使出了 2008 年 LHC 的故障事件，公众还是给予了我们压倒性的支持，甚至有些超出我们的预期，令我们备感欣慰。同时，我们还得到了许多其他领域科学家的支持。在现在的风雨飘摇之时，大家都在同一条船上。他们也全都

参加了示威活动。

回到 ZEUS 的事，我紧张地拍了拍轮班组长的肩膀，向他说明了仪表读数的异常。结果就像演戏一样，他从控制室一蹦而出，冲上楼梯，按下了整个“帆布背包”的紧急断电按钮。他们关闭了冷却水管道，却忘记了切断电源。再迟几分钟，这些精密而昂贵的电子仪器和几年来的劳动结晶都要化为灰烬了。

一心扑在科研之上（如果你有幸可以一直这样做的话）有时候确实是达成结果的最好方式。但保持沉默（不管以何种形式）不会给你带来任何出路，甚至有可能将你引入死胡同。无论是关于自身的经费，还是关于科学与支持科学又从中受益的社会之间的关系，科学家都应该积极参与到这些政治争论中。

当预算方案终于出炉后，我们发现，虽然科学遭到了一些削减，但少于大多数其他政府支出的削减。而且与之前估计的一些情形（可能将导致上百个研究职位和奖学金的取消，而且很可能将迫使我们关闭英国的主要科学设施或无法履行一些国际合作项目的义务）相比，情况要好得多。有些人认为，“科学至关重要”示威活动是导致这种相对良好结果的关键因素。当然，我们无法确定它究竟起到了多大作用，但这是我们的责任，而我们尽到了责任。

4.2　科学委员会

对科研经费的决议进行抱怨是科学家的一种职业病。相较于以旁观者的姿态抱怨，我更喜欢参与其中（之后仍是抱怨）。这就是我花费大量时间参与到各种研究委员会评审团中的一个原因。这项工作既无聊又压力巨大——简直是异常令人不快的组合。但换个角度来看，你可以了解事情是如何运作的，碰到许多既有趣又聪明的人，还能见到

许多精彩的科研项目。有时候你甚至可以资助它们。

2010 年 10 月，我作为 STFC 科学委员会的一个成员，考察了位于牛津郡的哈韦尔科技园。我们参观了钻石光源同步加速器[①]、大型激光器和 ISIS。ISIS 是一个储藏环，可以为许多科学应用项目提供中子束。它是那段时期我们有能力资助（至少部分资助）的项目之一。

中子是强子，和质子一样，它由三个夸克构成。但由于包含了两个下夸克和一个上夸克，所以它不带电荷。[②]中子由詹姆斯·查德威克（James Chadwick）在 1932 年发现。没有它，原子核将无法束缚在一起。它能够打破原子核——取决于人们的目的，这将引发核爆或让核电站运行。由于电中性，人们无法用电场操纵或加速中子。它确实存在磁偶极矩，但非常小，所以也很难用磁场操纵它。在 ISIS 中，一束质子束被猛烈撞击到靶子上，而中子飞跑而出——它们产生于质子和靶子中原子核的对撞。

你可以在中子束前放上各种东西。由于中子不带电荷，所以它将忽视包围着原子或分子的电子云，仅仅“看到”原子核。能够看得多清晰取决于原子核的种类。例如，水分子（H_2O）由两个氢原子和一个氧原子组成，而中子可以很强有力地将氢原子撞出——它们之所以能够非常高效地将能量传递给氢原子，主要是因为氢原子核就是一个质子，质量几乎和中子一样。（类似于两个等质量的斯诺克球对撞，入射球会完全停止运动，而将所有能量传递给被撞击的球。）这意味着，借助于中子束，水的结构分毫毕现。然而，铝（以及其他许多金属）对于中子而言几乎是透明的（中子–核子的散射截面随着质量、自旋和核子的内部结构变化很大）。通过一个有趣的视频（记录了利用中子散射透过铝制咖啡壶外壳所看到的咖啡制作过程），我们很直观地了解了

---

① 参见 1.1 节“为何如此庞大？”。

② $-{}^{1}/_{3}-{}^{1}/_{3}+{}^{2}/_{3}=0$

这个现象。其他更严肃的应用项目还包括观察高科技引擎中的液体流动过程，以便研究它的结构并优化设计。

此外还有其他一些应用项目。使用 ISIS 中子的科学家和工程师来自世界各地。另一个主要的商业应用项目是研究太空的高能粒子撞击大气层所引起的宇宙射线空气簇射对电子设备的影响。

电子设备依赖于半导体。如同 ATLAS 和 CMS 中的跟踪探测器，半导体中的电子只需要一点推动力就能够携带电流。因此，它们非常适合跟踪粒子的工作，而我们也可以通过精确地安排调整电流通过的时间和方式将它们制作成复杂的固态设备。全世界的集成芯片都如此产生，包括那些关系重大的（例如用来操纵航空飞机）的芯片。但不巧的是，这些复杂芯片中的电子同样也会被经过的粒子推动。一般而言，LHC 中的粒子不会对它们产生影响（虽然 LHC 中靠近对撞点的电子设备确实会受到影响），但宇宙射线空气簇射中的粒子肯定会。这将导致电脑内存中的一个 0 变成 1。如果它只是让 MP3 播放器跳过一个节拍，那也不算什么大不了的事。但它还可能会让飞机的自动驾驶仪失控，这就人命关天了。

考虑一个来自外太空、正在逼近地球的高能粒子。它将撞击大气层中的一个原子，很可能从中撞出一堆高速运动的强子、电子和光子。这些粒子会撞碎其他更多原子，而相应的碎片又会撞碎更多原子……由此产生了一个由许多高速运动的粒子组成的簇射，朝着地球表面前进，粒子的数目随着距离的接近而不断增加。在某一阶段（极大簇射），由于能量被太多粒子分享，以至于大多数粒子已经没有足够能量撞碎其他原子。此时，粒子逐渐减速运动直至停止，不再引发更多的原子碎片簇射，而簇射中的粒子数目也随之不断减少。极大簇射阶段恰好发生在平均海拔约 10 000 米的高空，这也是民航的典型巡航高度。这意味着，与在地球表面的我们相比，航空飞机遭受了明显多得多的宇

宙射线轰炸。

所以我们必须**非常确信**控制飞机的所有关键电子设备都能在高能粒子的轰炸中安然无恙。这也同样适用于地面的设备（尤其在电子系统越来越精密、运行速度越来越快的情况下），虽然标准可以低一些。将电子设备放在中子束前是检验它们能否经受住 10 000 米高空宇宙射线轰炸的绝佳方法，因为中子足够伪装成最危险的宇宙射线。

能够了解到这些事情，我尤其感到高兴，因为在 2010 年 10 月，我担任了 ATLAS 标准模型小组的召集人。这意味着航空旅行次数的剧增，基本上达到了每周伦敦—日内瓦往返的程度。虽然我们也使用电话会议和网络，不过当时的 ATLAS 无疑是一台巨型科研论文生成器，要想对它进行恰当的协调，面对面边喝咖啡边谈话必不可少。

旅行总是让我着迷。坦白说，当我申请研究生奖学金时，它是我选择粒子物理的一个理由。那时候，我连飞机都还没坐过，而全部“出国”经历就是几次去威尔士的旅行和去诺曼底的一日游。虽然现在旅行成了我工作的一部分，它的魅力仍然不减。

作为一件例行公事，再加上旅程的另一端等待完成的工作，让这一切有别于假日旅游。会议旅行并非例行公事——通常目的地都是陌生且激动人心的地方。但大型实验室，例如 CERN（瑞士日内瓦）、DESY（德国汉堡）、KEK（日本筑波，东京附近）和费米实验室（美国芝加哥），俨然已经成了另一个工作的地方。我很庆幸自己不用像许多粒子物理学家一样需要定期进行跨洋往返旅行。至少，当我通过电话给我的孩子们讲述睡前故事时，我们的夜晚没有时差。

例行公事旅行的一个奇怪特征是，遍布全球互不接壤的一些城市对你而言就如回家的路一样熟悉，但它们被鸿沟般的未知世界分隔。这令我感觉很怪异，而且让我回忆起初到伦敦时我使用伦敦地铁线路的方式：一旦走出某个地铁站，我就不知道如何到达另一个地铁站，

除非重新回到地下。当我终于通过卡姆登镇和布鲁姆斯伯里将我的肯蒂什镇和特拉法加广场“知识岛”连接起来时，我的心中涌现出莫名的安全感，甚至忘记了自己曾经迷路过。

当然，我永远不会从伦敦走到日内瓦，即使为了慈善也不会。如此远距离的通勤只能通过技术实现。科学技术同样也能帮助我们克服人与人的分隔，尤其是通过万维网以及构建其上的社交网络。这或许对“文化岛”和“社交知识岛”也同样适用。我有一些很熟悉的朋友，我信任他们，既能在需要帮助时为他们两肋插刀，也能在不需要时和他们小酌一杯，虽然我们平时都天各一方。我常常在想，结合旅行和远程双向交流，即通过公共交流平台（例如社交媒体）进行的人与人的交流，而非通过广播媒体，能否最终形塑出一个真正全球化的文明？全球化的意思是，到那时候，大多数人的社交网络在地理分布上比以往任何时候都要分散。许多年来，都是我们或者代表我们利益的公司和政府作出的决定产生全球化的影响。一直以来，都是权势阶级有能力向全世界表达他们的观点。而现在，小规模的双向关系网络有可能全球化、成为常规的事实是对这种不平衡进行修正的绝佳机会。我很好奇我们能为此做些什么。

4.3 勘查和测量

在 LHC 数据采集的刚开始几个年头，ATLAS 标准模型小组担负着许多个首次测量的工作，大到对撞生成的平均粒子数[①]，小到一些罕见的对撞事例（例如生成两个 W 或 Z 玻色子的事例），几乎涵盖了任何东西。到目前为止，我们有上百万“最小偏差”事例，其中只有几

① 参见 2.2 节“最小偏差”。

十个含有成对 Z 玻色子。

实际上，“标准模型小组”有点名不副实，因为标准模型的某些部分（顶夸克、底夸克衰变，尤其是希格斯玻色子的搜寻）有它们自己独立的小组。而且，“标准模型小组”这个称呼似乎暗示着我们已经知道了答案，即我们测量的将是标准模型。当然，实际上我们无法确信，至少我们无法保证，测量的所有东西都是标准模型。很多东西都是首次测量，而且是在以往任何时候都不曾达到过的高能区域。更重要的是，我们测量的过程通常都是标准模型做出预测的过程。理论往往给出非常精确的预测，所以做出能够和理论进行比对的精确测量就是一项高难度的挑战。

无论在何种情况下，结果一致将意味着确信标准模型在某个新的过程中仍然有效，而结果不一致将意味着要么标准模型有错误，要么计算或测量（但愿不是如此）有错误。在第一批 LHC 数据出现时担任这个小组的召集人一直以来都是我的梦想：我可以在大型强子对撞机提供给我们的浩如烟海的质子–质子对撞事例中，帮助 ATLAS 整理、理解和发表挖掘出的大量第一手物理信息。

ATLAS 发表的论文大致上可以分为两个类型：一类是新东西的搜寻，另一类是新东西的测量。

第一类由所谓“勘查”论文组成。勘查者迅速聚焦物理学新领域，直达 LHC 允许我们抵达的地方，寻找快赢的结果以及真正不寻常、意料之外的特性。即使他们没有发现任何东西，我们也对那个新大陆有了一些了解——“嘿，还没有发现喷金子的火山！”（或者，还没有发现超对称、还没有发现黑洞……）当然，一旦有人发现了一座喷金子的火山，他们就赚到了。不开玩笑地说，确实有可能发现那些东西，相似的惊喜以前已经出现过好几次。我们目前才刚刚到达山脚。

可以说与勘查者齐头并进、但常常稍微落后一步的是测量者。他

们对新大陆进行研究、测量，判断它是否遵从我们对地质学以及类似知识的认识。如果是——“成功！”，我们将现有理论的适用范围又扩大了。如果不是——“成功！”，我们发现下面藏着一些东西，有可能是喷金子的火山。我们将和勘查者协力开挖一个矿井，将它找出来。相关实例包括测量目前最高能量夸克和胶子对撞生成的喷注、单光子或 W 玻色子。

当然，途中还存在第三类，它来自希格斯小组。在那个领域，我们对事物如何运行的理解暗示着必须存在一个喷金子的火山（好吧，这里指希格斯玻色子），否则标准模型将失效。这段时间，我们很认真地开始了此类搜寻。虽然目前还没有发表任何结果，但已经收集到了足够多的对撞数据，画出了数据图。对我和 LHC 其他人而言，猜测希格斯玻色子是否藏身于这些数据之中已经成为了一项消遣活动。

LHC 一天运行 24 小时，一周运行七天。前端加速器积累、加速足够多质子，将之填充 LHC，然后 LHC 继续将它们加速（当时从 450 GeV 加速到 3500 GeV），之后将这两束反向圆周运动的粒子束维持几个小时。每经过一个周期，一些质子发生对撞。实验的轮班组员需要努力保持探测器一直记录数据，时刻睁大眼睛关注动态。每一次质子填满 LHC，更多领域由此打开。我们的压力在于必须非常迅速地对它们进行研究。而且，虽然这属于开拓区，但没人愿意成为莽撞的牛仔，所以全部工作都要准确无误地完成。虽然即使我们做错了，没有人会死，地球也不会毁灭，但时间会白白浪费，我们会走入死胡同。由于数据仍然会持续不断流出，真相最终将大白，错误最终也会被发现。在这种情况下，取决于错误轻重程度，轻则引人尴尬，重则工作不保。所以即使勘查者也必须小心翼翼。

4.4　南极的小插曲

除了 LHC，其他物理也在进行中。在我 UCL 楼上办公室的同事瑞安·尼科尔（Ryan Nichol）会时不时与美国国家航空航天局（NASA）一道，在南极洲放飞探测热气球。他甚至偶尔会亲自前往南极。和前往日内瓦相比，这可谓有利有弊。探测气球非常巨大，它们完全膨胀时比温布利球场还大。它们担负着一个名为南极瞬态脉冲天线（Antarctic Impulsive Transient Antenna，ANITA；这个缩略语几乎算是既构思巧妙又引经据典，除了有点擅用了一个 N）的实验。

ANITA 试图探索天体物理学的一个重要问题：宇宙射线从何处来？又如何产生？我们知道，每时每刻都有来自外太空的超高能粒子撞击地球（有时候还撞击飞机）。这些粒子的光谱延伸到极高能量，高于 10^{20} eV。要知道，LHC 粒子束的能量是几千 GeV，即几万亿（10^{12}）eV，而最高能量的宇宙射线粒子比它高百万倍！试想一下，哪种加速器可以产生如此高能量的粒子？事实上，科学家确实想过。旋转中子星、银河系中心的黑洞、超新星冲击波是其中一些比较平凡的设想。超重暗物质粒子和“拓扑缺陷”（宇宙在大爆炸之后由于各处冷却速率不同而形成的几个部分之间的边界，它们有可能表现为宇宙弦或磁单极子）的衰变是其中一些相对不寻常的设想。总而言之，取决于所用的模型（如果有的话），中微子和其他粒子的数量比值将有所不同。

中微子还有另外一个来源。宇宙充满了大爆炸时期存留下来的超低能光子——宇宙微波背景。穿行宇宙之间的质子会和这些光子相互作用，如果质子的能量足够高，它们将和这些超低能光子对撞生成一种新粒子（称为 Δ 粒子，类似质子，但比质子重）。鉴于这种可能性，对撞发生的概率得以提高。这意味着高能的宇宙射线质子将减少。然

而，Δ 粒子会衰变生成 π 子，而 π 子又会衰变生成中微子。[①]

事实上，当这些粒子和大气层中的原子碰撞时，将会发生一些非常有趣的物理现象。由于它们撞击的是静止的大气层，而非另一个以相同能量迎面袭来的粒子，所以能够用来生成新粒子的能量将大大减少。但这仍然比 LHC 的能量高百倍。不嫌其烦地再说一次，宇宙处处发生的此类对撞正是我们确信 LHC 不会引起灾难性后果的一个理由。

我们真的想了解它们从何而来，又是在哪种极端条件里产生，而 ANITA 的使命就是通过寻找中微子来解开这些谜题。或许这并非最明显的选择，因为中微子是出了名的难寻找。但这也意味着它们不会受到宇宙中从生成之地到 ANITA 之间任何材料和磁场的影响。所以，如果我们能够测量它们的方向，就可以直接追踪到它们的源头。

ANITA 实际测量的是短波信号，利用它们构建南极洲的图像。我想，和用中子看咖啡制作一道，这也可以归入“以另类方法看世界”系列中。他们能够测量无线电波的偏振，即电波传播时电磁场振动的方向。中微子相互作用将生成垂直极化脉冲。在 ANITA 首航中，他们没有发现任何此类脉冲，所以当然也没有测量到中微子。但他们发现了其他一些东西。他们观察到了 16 个水平极化无线电波脉冲。

这些脉冲是宇宙射线空气簇射的信号。正负电子对在这些簇射中生成，它们绕着地磁场磁感线盘旋，发射出特征明显的电波讯号，被 ANITA 接收。正如瑞安所言：

> 宇宙射线空气簇射电波信号确实是意外的收获，我们碰巧在为寻找中微子而进行的“背景”事例样本检查中发现了它们。刚开始时我们未能理解这个发现的重要性，以至于在

① 即所谓 GZK 中微子，由肯尼斯·格莱森（Kenneth Greisen）、格奥尔基·扎采平（Georgiy Zatsepin）和瓦季姆·库兹明（Vadim Kuzmin）在 1966 年提出。

> ANITA 第二次起航时，为使中微子寻找效率最大化，我们移除了这些水平极化信号。真是愚蠢的决定！不用说，我们肯定会在第三次起航时重新恢复它们。

这些簇射之前其实已经观测过，例如在阿根廷的奥格实验中。但以新的方法观察它们、测量它们的来源也是非常重要的工作。ANITA 无心之中展示了一项很有潜力、非常重要的新技术。

来自太阳、宇宙射线空气簇射、反应堆和加速器中的中微子让我们知道了许多粒子物理知识。太阳系外中微子的追捕工作同样也能告诉我们许多粒子物理和天体物理学知识。和 ANITA 一样，南极巨大的冰立方（IceCube）阵列也在寻找它们。IceCube 是一块范围一立方千米的冰川，里面铺设了光电倍增管，用来测量中微子和冰川相互作用释放的光线。它预计将在三年后首次观察到高能中微子。

4.5 质子内部

大部分时间（虽然不是全部），LHC 让质子对撞。质子并非基本粒子，它由夸克构成，通过胶子束缚在一起。当研究质子对撞时，我们需要将这个事实牢记在心。而且，我们需要尽可能了解质子内部夸克和胶子的分布情况。

在某个尺度，质子就是两个上夸克和一个下夸克组成的原子核小家庭。但当你往里窥探，所见的只是一团混乱。首先，夸克之间不断交换着胶子，这也是它们束缚在质子中的原因。但即使只是观察（或尝试去观察）单个夸克，也会出现令人惊讶的物理现象。

如果质子由处处均匀的糨糊物构成，那么当你探测它们时使用的光子波长越小，看到的糨糊物范围就越小。但当你探测质子内部的夸克时，一旦拥有足够分辨率可以看清它们，无论之后如何提高分辨率，

你看到的东西几乎都一样。这是因为夸克是基本粒子，无论多接近它们，看起来都像是一些小点。这种现象称为“标度无关性”（scaling），1960年末在SLAC的一个实验中得到验证。它是非常有力的证据，表明默里・盖尔曼（Murray Gell-Mann）提出的用来解释强子质量和量子数规律的夸克是真实的物理存在。标度无关性的发现为杰罗姆・弗里德曼（Jerome Friedman）、亨利・肯德尔（Henry Kendall）和理查德・泰勒（Richard Taylor）赢得了1990年的诺贝尔物理学奖。

但理论物理学家注意到，如果夸克可以辐射胶子，标度无关性就不会严格成立。而根据量子色动力学，它们确实倾向于辐射胶子。当你试图观察夸克时（例如用光子撞击它们），看到的很可能是已经发生过辐射的夸克。由于质子中存在三个夸克，你可能会认为它们平均每个携带三分之一的质子动量。然而，我们观察到的比例（毫无新意地，通常记为 x）通常远小于三分之一，因为辐射出的胶子携带走了一些动量。

如果通过光子撞击的方式观察夸克，光子的波长将决定分辨率，亦即我们可以看得多仔细。波长很小的光子可以看清很细微的距离，因此能够告诉我们夸克是否辐射胶子，哪怕胶子和夸克仍然非常靠近。而波长较长的光子无法从夸克中分辨出此类胶子，因此将它们判断成一个夸克，动量为夸克的动量加上辐射胶子的动量。小的波长对应高动量[1]，因此与低能量的光子相比，高动量的光子将在质子中看到更多夸克，更小的比例 x。

上述过程包含着大量物理知识。总之，观测越精确，真相越清楚。换句话说，你越靠近夸克，能够分辨的胶子辐射就越多，因此夸克携带的动量比例 x 就越小。而这违背了标度无关性。这种“标度无关性

---

① 我们会在7.3节“波”中详细阐述。

破坏”同样吻合目前主要来自 HERA 实验的更精确数据。它是证明“量子色动力学是正确的强相互作用理论”的基石。

令人惊讶的是，像质子这样的复杂物体，内部进行着如此激烈的物理过程，却能够永远作为一个整体存在，不会崩坏。“永远”不是可以测量的东西，但我们可以确信它们平均至少可以稳定存在约 10^{29} 年。我们之所以知道这些，是因为诸如 IMB①和现在的超级神冈探测器实验已经在很长一段时间里非常、非常仔细地观察着非常、非常多的质子，却没有发现任何质子衰变。鉴于宇宙的年龄似乎是 1.4×10^{10} 年，质子衰变时间的界限意味着目前质子平均生命周期的界限比宇宙的年龄长 7 000 000 000 000 000 000 倍。

质子除了是一团混乱的夸克，还是一个氢离子。氢，这个宇宙中最常见的元素，其实就是质子粘着一个电子。和氦一样，大部分氢在大爆炸之后很短时间内生成，而其他物质都是一段时间后由这两种元素在恒星中聚变形成的。在此过程中，一些质子转变成中子。然而，大部分氢的质子在 138 亿年中都保持原样。

所以，如果任由它们自生自灭，质子将万事无忧。当然，我们不会放任自流，我们会用 LHC 将一些质子击碎。将物体击碎是粒子物理学家由来已久的一种研究物体结构的方法。当我在汉堡为 ZEUS 工作时，我们用一束电子束击碎质子。击碎东西的方法有时候确实很有用。我的一个朋友某个周日早上（在度过漫长的周六之夜后）从汉堡鱼市买了一个甜瓜。在坐出租车回家的路上，他不知何故总是以为自己不小心买了一个南瓜而非甜瓜。只有当他厌恶地将甜瓜摔裂在地面上，他才确信它确实是一个甜瓜。

通过在 HERA 和 LHC 上击碎质子，我们能够知道质子中的夸克

① 参见 3.6 节“名字、声望和引用率”。

究竟如何分布。比如说，在 LHC 中生成 W 玻色子时，带正电荷的 W 玻色子（W^+）可以通过一个上夸克和一个反下夸克湮灭生成，而带负电荷的 W 玻色子（W^-）可以通过一个反上夸克和一个下夸克湮灭生成。反上夸克和反下夸克属于质子中标度无关性破坏的东西。它们不仅辐射胶子，这些胶子还会分裂成夸克–反夸克对。换句话说，一个质子不仅包含胶子，还包含远多于三个的夸克，以及大量反夸克。但如果同时减去相同数量的夸克和反夸克，最终将仍然剩下三个夸克。基于这些原因，上夸克的数量是下夸克的两倍，而 W^+和 W^-生成的相对比例和分布可以告诉我们这些夸克在质子中通常所处的位置。2010 年末，ATLAS 和 CMS 实验都发表了相关测量结果，之后又给出了更精确的测量。加上 HERA 和其他实验的数据，它们深化了我们对奇妙的质子内部结构和运行机制的理解。

我发现，量子色动力学的唯象领域有数不胜数的内容！量子色动力学的方程（我们称之为拉氏量①，你可以在 CERN 的礼品店看见它印在纪念杯和文化衫上）只有一行。至少对我而言，我从中看不出任何线索表明如此简单的公式包含着诸如强子质量和标度无关性破坏之类的东西。许多人终生致力于研究、计算以及测量这个方程的内涵。

当我在 HERA 工作时，做的就是这事（研究量子色动力学）。但大多数人听到我在汉堡工作时，他们不会想到我在做这种事。通常他们马上想到的是："那么，你在军队里服役？"（并且推断应该是一些不需要理平头和力量训练的角色。)而他们可能会说的第二件事则类似于："莱泊帮？哇噢！"

我确实喜欢莱泊帮。它可以算是英国布莱克浦的一个更露骨版本。

① 以约瑟夫-路易斯·拉格朗日（Joseph-Louis Lagrange），或者他出生时的名字朱塞佩·洛多维科·拉格朗日亚（Guiseppe Lodovico Lagrangia）命名。这是描述物理系统的一个方程，它其实就是动能减去势能。

实际上，我已经有些年头没有去布莱克浦了，所以或许它现在也已经很露骨。当有客人来时，带他们去莱泊帮潇洒一晚似乎就是我的责任。每个夜晚似乎都过得差不多、难以区分，除了其中一个异常怪异的通宵，它引发了一段最为超现实的经历。

通常我们会光顾各种酒吧，然后去跳舞。性产业其实只是夜色的一部分，还有其他一些非常棒的夜生活。然而某个晚上，我们一行三人决定仔细地光顾一些脱衣舞酒吧和钢管舞场所（虽然不是妓院）。

我们精心选择场所，确信门票费包括了“免费”的无限畅饮，这样即使途中需要匆忙离开也不会有什么损失。一些钢管舞表演确实很精彩，但我们看的最后一场就一般般了。当时大约已经是周日凌晨四点半。那是一个很漫长的夜晚，我估计在场的人都不想待到这么晚。之后又出现了更多“免费”啤酒，以至于我放松了对周围环境的注意，直到一只裸露的大腿突然伸到我的鼻尖。我将几乎满满一罐拉格啤酒倒到了夹克衫的内袋，然后我们匆忙离开了。

汉堡周六深夜一个令人期待的地方就是紧随其后周日凌晨的鱼市（即之前引起甜瓜/南瓜困惑的地方），它大约在凌晨五点开市。那是由非常得体的周日早市顾客和像我们一样醉醺醺的夜猫子们组成的生机勃勃的集合。那里有鱼虾、植物、廉价衣物、甜瓜、咖啡、啤酒，最重要的是，还有土豆煎蛋——大份油炸土豆上面盖着三个煎蛋。正好是我需要的东西。

恼人的是，在我摇摇摆摆地拿着装着土豆的盘子穿过鹅卵石路回到我们座位的途中，一个煎蛋掉了。回过头寻找，我发现它正躺在鹅卵石路上闪闪发光，仍然完好无损没有污渍，蛋黄一面朝上。当然，我又走回去想要把它捡回来。但不幸的是，当我弯腰捡蛋时，有几个毛手毛脚的人将啤酒洒到了它边上。我站起来四处寻找，但他们已经消失不见。我再次弯下腰，又有更多的啤酒洒了下来！

最终我还是放弃了，带着剩下的两个煎蛋回到全程目睹这一切的同伴身边，他们已经笑得前仰后倒。我和他们抱怨了啤酒的事情。等到他们终于笑好了才对我说，我自己夹克衫口袋里的啤酒才是罪魁祸首。

这还没到超现实的部分。

真正超现实的事情发生在八个小时之后。当吃好鳗鱼咖喱饭后，在睡眠不足的情况下我去游泳了（那时我还很年轻）。游完泳，我坐在泳池边，以一种在德国得体有教养的方式喝着醒酒药。突然灯光全都熄灭了。大家都走出了泳池，一些奇怪的音乐响起。一排大约五到十岁、带着奇怪帽子的小孩子蹿了出来。他们一个接一个跳进了泳池，与此同时，一个大人点亮了插在每个孩子头上的蜡烛。他们绕着泳池游泳（如果我没记错的话，约有 40 个孩子），最小的几个勉强才将蜡烛保持在水面之上。之后他们又爬出泳池，同时一个大人依次熄灭了每根蜡烛。最后，孩子们又蹿了出去，音乐停止，灯光重新点亮，大家都像什么事情也没有发生一样继续游泳。我到现在还不知道当时究竟是怎么回事，只好将之归咎于鳗鱼。

我离题了，还回到 2010 年的事。圣诞节就要来临了，LHC 又为我们带来了一些趣事。

4.6 圣诞节的重离子

大型强子对撞机之所以如此命名，是因为它很庞大，且让强子相互对撞。直到 2010 年 11 月，它还只对撞了一种强子（质子），所以即使称它为大型质子对撞机也没错。但在 2010 年末，它显示出了它的多用途。既包含质子也包含中子的铅离子被装进了隧道，相互对撞。LHC 临时变成了重离子对撞机。

虽然铅原子核的粒子束能量比质子束高许多（575 TeV 相比 7 TeV），但每个核子（核子是质子和中子的统称）的能量要小，只有 1.43 TeV。因此，每个夸克或胶子的平均能量更低。当 LHC 以这种模式运行时，它实际上已经不再是“能量最前沿”的机器。

尽管如此，你仍然可以理直气壮地将质子物理项目和重离子物理项目都描述为“探索大爆炸的最初时刻”。我们值得花些时间思考为何可以如此描述，为何两者又有所不同。

基于目前我们观测到宇宙正在膨胀的事实，可以很合理地设想过去的宇宙比现在小。顺着这种思路外推[①]，我们也不难设想，由于能量守恒，过去的宇宙含有与现在的宇宙相同的能量，但在更小的空间中。因此，能量密度（本质上就是温度）比现在高。然而，上述论证中隐含着一个漏洞。别忘了诺特定理[②]将“能量守恒”和“物理学定律不随时间变化”联系了起来，这等价于说在物理学范围内，所有时间都没有区别。但如果考虑宇宙，很显然时间并非完全一样。存在一个所有观察者都认同的时间零点——大爆炸。我们可以测量相对于大爆炸的绝对时间，也就是我们称之为宇宙年龄的量。这表明物理学并不需要看起来完全相同——所有时间都不一样，同时存在一个公认的“时间零点”。所以当我们讨论整个宇宙时，真的可以相信能量守恒吗?

在某种意义上，是的。在广义相对论中，描述宇宙的一些主要方程不会变化，所以即使你选择了一个不同的原点，它们也保持原样。因此，你可以恰当地定义能量，使得它仍然守恒。但要这样做，你就需要将引力场自身的能量也包含进来，在广义相对论中，就是时空的曲率。一些宇宙学家为了拯救能量守恒，选择了这样做，但也有不赞成的。无论哪种态度，物理还是一样的——这些都只是对相同方程的

① 有时候我自己也喜欢用不严谨的外推法。抱歉。

② 参见 3.5 节“超对称”。

不同解释。

人们发现，如果能够正确地研究宇宙学，那么得到的主要结论都将一样。早期宇宙的平均温度比现在高，因为早期宇宙主要由物质占主导，而更早之时主要由光子占主导。相应地，这也意味着其中的所有粒子平均运动速度更快，因此对撞能量也更高——能量随着你从当前时间往大爆炸时刻接近而递增。

随着粒子对撞的能量越来越高，不同的物理效应开始出现。例如，如果原子以足够高的能量对撞，它们将撞出彼此的电子，即它们发生了电离。当能量高到足以让电离频繁发生时，宇宙将充满等离子体（plasma）——电离原子和电子的混合体。光线无法穿透等离子体，它会被所有带电粒子不断散射。

经过一段时间，宇宙冷却到某个程度，其中主要的对撞能量太低以至于电离过程难以继续。这意味着不带电的原子和分子能够生成并保持。相应地，这也意味着光线可以更轻松地穿梭其中，因为光子不会持续不断地与带电粒子发生相互作用。这些目前仍然充满整个宇宙的光子还在继续运动。它们的温度比以前低很多了（约 2.7 开尔文，或–270 摄氏度），在 1978 年被阿诺·彭齐亚斯（Arno Penzias）和罗伯特·威尔逊（Robert Wilson）发现（刚开始他们误以为是鸟粪污染了探测器）。

一些实验项目，例如宇宙背景探测者（Cosmic Background Explorer，COBE）、威尔金森微波各向异性探测器（Wilkinson Microwave Anisotropy Probe，WMAP）和最近的普朗克卫星，研究了这个时期的物理，也就是大爆炸之后 40 万年第一批原子形成的时期。从这些光子的涨落和频率，我们有可能了解到之前在这 40 万年里发生了什么。但 LHC 的对撞能量允许我们直接研究那段时间主宰宇宙的物理过程。

大爆炸后几分钟，由于对撞太激烈，以至于即使原子核也无法保

持稳定。那时候，质子和中子随处皆是。它们是核聚变的能量来源，科学家正在国际热核聚变实验堆（International Thermonuclear Experimental Reactor，ITER）利用它们研究可控核聚变。

再往回退一大步（回溯到大爆炸后百万分之一秒），即使质子和中子也无法保持稳定。构成它们的胶子和夸克散布在整个宇宙中（那时宇宙体积还很小）。这是物质的一种新形态，我们称之为“夸克–胶子等离子体”，虽然布鲁克黑文国家实验室的相对论重离子对撞机（RHIC）显示它实际上或许更像夸克–胶子液体。在 2010 年 11 月，通过对撞铅原子核，LHC 得以重现这些东西。（RHIC 利用了金原子核而非铅原子核。虽然金块更加耀眼，但对物理来说并没有区别。）ATLAS 和 CMS 做了一些测量，而 ALICE 探测器（就在 ATLAS 隔壁）特别经过了优化，以便能够进行更精确的测量。

LHC 在质子–质子对撞中生成的能量更集中。它们将我们带到了另一个能量阈值（电弱对称性破缺能标）之上。在此能标之上，弱力和电磁力一样强。这大约发生在大爆炸后 10^{-11} 秒，即小数点和 1 之间夹着十个 0。更早之前，能量还要高，但基本上没有人知道那时发生了什么，虽然人们提出了许多可能理论，也知道一些实验数据给出的约束。

稍后我会详述电弱对称性破缺，现在暂且让我们先回到夸克–胶子等离子体的话题。

我们迅速分析和发表了来自重离子对撞的实验数据。11 月的某个周二，我在 ATLAS 控制室中第一次轮班，监控着一些探测器，而越来越多铅–铅对撞的实验数据不断产生。在忙里偷闲时，我还准备着两个讲座。但更重要的是，我努力让自己跟上论文的评审进度。那是一篇基于新鲜出炉的铅–铅对撞数据的论文。

几天之后，这些结果被公布。[1]它们仍然是对强子喷注的测量，但这一次，喷注由重离子对撞产生。而更令人感兴趣的其实不是观察到的喷注，而是那些消失的喷注。

别忘了，强子喷注是由一对夸克或胶子对撞导致它们冲出铅原子核中的质子（在此情况下还有可能是中子）而形成的粒子喷溅。通常一次对撞至少将产生两道喷注，相互平衡以保证动量守恒。一道喷注冲向某个方向，而另一道相等的喷注冲向相反方向。

我们在一些事例中观察到了这种现象，但我们还记录到了大量事例，其中只有一道喷注可见。动量仍然守恒，但平衡第一道喷注动量的并非另一道喷注，而是一道含有低能粒子的更发散的喷溅。

其中发生的事情似乎是这样的。按照计划，两个铅原子核对撞，短暂生成了由夸克和胶子组成的糊状物。这确实是大爆炸百万分之一秒后充满宇宙的物质形态。在糊状物内部，分别来自两个原子核的一对夸克或胶子以极高的能量对撞。

一般而言，如果对撞发生在糊状物的边缘，一个夸克只要穿过很短距离就可以脱离糊状物——这就是大喷注。但对另一个反方向运动的夸克而言，它需要穿过大量又热又致密的奇怪物质。因此，它被四处散射，在穿越过程中损失了大量能量。这就是“消失”的另一道喷注。

有关这种行为的迹象之前已经在 RHIC 注意到。但在 ATLAS 上，我们第一次真正对此进行了测量。而且并非只是测量几个对撞事例，事实上，对于一个给定的对撞，我们能够测量有多少“糊状物”生成（铅原子核正中心对撞时生成得多一些，而一掠而过的对撞生成得少一些）。我们发现，在生成越多糊状物的对撞事例中，第二道喷注损失的

① 参见：http://arxiv.org/abs/1011.6182.

能量也越多，完全符合预期。这意味着，我们确实对糊状物的性质进行了很准确的测量。我们当时实际上是利用夸克进行了研究，通过将夸克射到构成早期宇宙的相同材料当中。

基于这些初步结果，ALICE、ATLAS 和 CMS 给出了许多有关这种效应的更详尽结果，同时也采用了其他方法研究这种夸克和胶子不再束缚于强子中的新物质形态。有关夸克在运动中损失了多少能量以及能量如何损失的各种细节，告诉了我们许多关于强相互作用、新物质形态和早期宇宙的知识。

4.7 锁定希格斯粒子

在 2011 年 1 月 31 日，我们作出决定，不仅不再按照原定计划在 2012 年夏天关闭 LHC，而且还要让它继续运行到 2012 年末。这将产生很大影响。虽然尚未发表任何关于寻找希格斯粒子的论文，但我们已经深入了解了 7 TeV 质子对撞的物理、探测器的表现以及 LHC 产生实验数据的能力。一切进展似乎都很顺利，而从我们现在能够作出的规划可以很清楚地知道，如果 LHC 能够运行到 2012 年末，我们有很大概率找到希格斯玻色子或证明它不存在。所以现在正是好时机详述为何希格斯粒子非常重要。

之前已经提到，对称性在物理学中非常重要。标准模型中描述基本作用力的理论都是规范理论，而作用力由定域对称性生成。[①]希格斯玻色子的重要性与此相关，但更准确地说，它事关破坏（或者至少隐藏）对称性，而非加入对称性。为了理解它的机制，请听我细细道来。

① 参见 3.5 节“超对称”和“术语：规范理论”（第 98 页）。

在 20 世纪中叶,标准模型首先实现的一个部分是电磁相互作用的相对论量子场论,即量子电动力学(QED)。保罗·狄拉克(Paul Dirac)写下了一个方程,能够在和狭义相对论不冲突的情况下描述电子行为。最终,理查德·费曼(Richard Feynman)、朱利安·施温格(Julian Schwinger)和朝永振一郎证明了这个理论是内部一致的。这种内部一致性尤其和一种叫做“可重整化”(renormalisability)的性质相关。量子电动力学一直受到无穷大的困扰,这些无穷大来自电子质量和电荷的量子修正。

例如,运动中的电子会先发射光子再重新吸收光子,形成一个闭合的小圈。为了计算它在量子场论中发生的概率,你需要对光子所有可能的能量求和,而唯一需要遵从的条件就是光子经过小圈之后仍然和进入小圈时的光子相同。不巧的是,由于这是一个闭合的圈,所以**任何**进入小圈的能量都可以在小圈末端得到偿还(或者说抵消)。所以这个条件根本算不上限制。事实上,任何能量都可以在小圈中流动!这简直就是噩梦,因为这些小圈中的能量为电子提供了某种无穷大的“自能”(self-energy),而这意味着(又是因为 $E=mc^2$)电子质量变成了无穷大。你根本不必是个实验天才就可以知道真实电子不会出现这种情况。事实上,我们测量过电子质量,它只稍微多于半个 MeV。[①]

直觉告诉我们,需要把无穷大替换成测量到的量。费曼、施温格和朝永振一郎证明[②],如果将无穷大的电子质量和电荷替换成测量到的电子质量和电荷,理论中的**所有**无穷大都将消失,而理论(在这两个实验数据输入的情况下)可以精确预测所有涉及电磁场的过程。将无穷大的质量和电荷替换成测量到的有限质量和电荷称为“重整化”。费

① 更准确地说,0.510 998 910 ± 0.000 000 013。

② 他们利用不同方法相互独立地作出了证明。之后弗里曼·戴森(Freeman Dyson)证明了几种方法都是等价的。

曼不是很喜欢这种做法，称它为“只是将电动力学发散的困难扫到地毯下藏起来”。但这句话直接引用自他的诺贝尔物理学奖受奖演说[1]，所以也不能说重整化对他有什么不好。很明显，可重整化的性质非常重要。没有人愿意看见无穷大出现在真实物理过程的预测中。

其他基本作用力也存在类似情况。人们为强力和弱力提出了许多模型，但判断它们是否可重整化非常困难，虽然有些模型很明显不可重整化。之后杰拉德·特·胡夫特（Gerardus't Hooft）和马丁努斯·韦尔特曼（Martinus Veltman）证明，作用力由规范对称性生成是可重整化的充分必要条件。这个结论非常重要，因为它意味着从对称性生成作用力的技巧并非只是构建可预测理论的一个巧妙方法，而是**唯一**方法。它也意味着费曼所抱怨的将困难扫到地毯下的做法并非一个卑鄙技巧，而是根植于理论的对称性中。

这是个重大突破，他们也当之无愧地赢得了 1999 年的诺贝尔物理学奖。但是标准模型尚未走出困境。问题是，由规范对称性生成的玻色子质量总是为零。对量子电动力学而言，这不是什么麻烦，因为光子确实没有质量。对量子色动力学而言，这也不是什么麻烦，因为胶子也没有质量。但对任何弱力的理论而言，这是个大问题，因为 W 和 Z 玻色子质量不小。所以表面上看，如果你写出弱相互作用的规范理论，你就得到了无质量玻色子。但如果为了符合测量结果而人为加入质量，这就破坏了规范对称性，因而产生了不可重整化的理论。

现在，我们可以隐藏对称性，即我们可以构造完全对称的理论却仍然能够产生不对称状态。关于此事，最常用的一个比喻就是葡萄酒瓶中的玻璃珠。[2]

---

① 他和施温格、朝永振一郎一起获得了 1965 年的诺贝尔物理学奖。

② 事实上，有一次我在英国皇家研究院（the Royal Institution）演示时打破了酒瓶。所以我建议使用塑料小球而非玻璃珠。

如果你从上往下观察酒瓶，可以发现酒瓶绕着中心存在圆周对称性。也就是说，以瓶颈中心和瓶底中心的连线为轴线旋转，酒瓶没有任何变化。

现在设想酒瓶中有一颗玻璃珠，大概因为酒瓶在晃动的缘故（注意安全），珠子在其中弹跳。这是早期宇宙的一个体现，而玻璃珠代表大爆炸不久之后的一个高能粒子。经过一段时间的平均，这个系统仍然是对称的，因为玻璃珠可以出现在酒瓶里的任何地方，并不会倾向于待在其中的任意一点。

现在将酒瓶放在桌子上，让玻璃珠慢慢停止下来。由于酒瓶底部朝内凸起，所以玻璃珠无法停留在瓶底中心，而是会滚到一边。一旦它停止在边缘某点，酒瓶状态就不再对称了。

这就是隐藏对称性的一个例子。所有支配这个系统的物理学原理（引力、玻璃珠的动能、酒瓶的形状）对中心轴线都是对称的。但一旦动能耗尽，系统的最终构型就不再对称。这个最终构型就是系统的最低能态，物理学家称之为真空或基态，实际上就是指系统能量最小的态。

这个技巧可以用来解决标准模型中保持必要对称性时仍然能够存在有质量粒子的问题：保持系统方程的对称性，但巧妙构造以保证生成不对称的基态——而这种基态就是宇宙目前所处的状态。在基态中，基本粒子（尤其是 W 和 Z 玻色子）可以拥有质量，同时弱相互作用仍然是规范理论。

在此之前还有一步，即自发对称性破缺。而由于这是所谓“六人帮”——罗伯特·布劳特（Robert Brout）和弗朗索瓦·恩格勒特（François Englert）；彼得·希格斯；杰拉尔德·古拉尔尼克（Gerald Guralnik）、C. R. 哈根（C. R. Hagen）和汤姆·基布尔（Tom Kibble）——在 1964 年做出的最关键一步，我们最好将它讲完。

“自发”（spontaneous）对称性破缺的想法以前就已经出现过，而且在其他领域得到了实现。但它存在一个问题，即以杰弗里·戈德斯通（Jeffrey Goldstone）命名的“戈德斯通定理”。这个定理指出，当对称性自发破缺，将会出现无质量标量粒子（即没有自旋的粒子），作为量子场的可能激发态。①

为了理解这在酒瓶比喻中的意义，让我们给瓶底边缘的玻璃珠一个推动，给系统增加一点能量。如果你将玻璃珠往瓶底中心推动，在推动力足够大时，它将冲上瓶底的凸起，之后再滚下来。在滚上和滚下瓶底凸起的过程中，玻璃珠存在着一个可能的“激发态”。在量子层次，为了让“玻璃珠”能够滚上和滚下瓶底凸起般的势垒，你也需要提供足够大的能量。而这个能量的最小值在量子场论中就是质量。“滚上和滚下”的简谐振动对应于有质量粒子。

但如果你将玻璃珠沿着瓶底凹槽推动，它将一直绕着瓶底边缘滚动，不会滚回来。事实上，由于隐藏对称性，瓶底边缘任意一点的能量都相同，你只需要提供任意小的能量，就可以让玻璃珠滚动。不存在能量最小值意味着它对应于无质量激发态，即无质量粒子。此类无质量粒子来源于系统的破缺（或者说隐藏）对称性，而戈德斯通定理指出它一定会出现。

这是一个大麻烦，因为无质量标量粒子在自然界中并不存在。事实上，南部阳一郎早就指出，自发破缺的对称性可以允许强子（例如质子和中子）拥有质量。但由于戈德斯通定理，同时还会出现一个无质量的标量粒子。而它并不存在。

布劳特、恩格勒特、希格斯和其他几个人所做的正是表明，如果规范对称性**和**自发破缺对称性同时存在，无质量标量粒子（源自破缺

---

① 参见“术语：场、量子以及其他”（第 59 页）。

对称性）就可以被吸收进规范玻色子（源自定域对称性）。这既允许了规范玻色子拥有质量，又消除了引起麻烦的无质量标量粒子。

这是一个巨大突破，虽然当时没有受到足够重视。之所以不受重视，部分是因为这个想法在标准模型中的位置是当时人们没有料想到的。

当“六人帮”研究这个课题时，和南部阳一郎一样，他们主要考虑的是强子的质量。这是 1960 年初的事情，那时 W 和 Z 玻色子还没有被发现，而标准模型尚未成型。我们现在知道，强子以其他方式获得质量。它们并非基本粒子，它们的质量来自夸克的束缚能。正因为如此，希格斯玻色子只关系到日常事物百分之一的质量，而量子色动力学关系着剩余的百分之九十九。

但这百分之一至关重要，因为它是基本粒子的质量。对 W 和 Z 玻色子的质量尤其重要，因为别忘了，如果没有希格斯粒子，它们的质量似乎和规范玻色子的身份不相符。

2011 年 4 月，我在爱丁堡参加一个科技节。爱丁堡是彼得・希格斯的家（从他 1960 年离开 UCL 起）。火车一抵达爱丁堡威弗莱站，我就爱上了爱丁堡。我爱它水仙花盛开的山谷一条铁路贯穿其中，而其他大部分城市通常相伴的只有普通的一条河。我去爱丁堡参加一个“建造大型强子对撞机”的科普活动。活动由喜剧演员罗宾・英斯（Robin Ince）主持，LHC 建设的项目主任、在 2008 年 LHC 启动仪式上倒计时报数的林・埃文斯将做个讲座。我的任务则是在开幕时向人们解释**为什么**要建造 LHC。

寻找希格斯粒子并不是我们建造 LHC 的真正目的。其实我们想知道的是，为什么电磁力和弱力的强度在高能区域相近，在日常生活能量区域却如此不同。我们知道，这种区别来源于 W 和 Z 玻色子拥有质量而光子没有质量。由于光子无质量，所以辐射或交换光子都相对比

较容易。而且光子不衰变，所以能够传播很长距离（甚至在宇宙中运动亿万年之久）。另一方面，为了生成 W 或 Z 玻色子，需要提供很多能量。而且即使生成了 W 或 Z 玻色子，它也会很快衰变成其他粒子。这意味着弱力是短程力，而且强度确实很弱。但如果相互作用中的能量足够高以至于你可以忽略光子和 Z 玻色子的质量区别，两种力的强度就非常相似了。两者聚集点（如果沿着能量升高方向）或者说分离点（如果与宇宙目前的情况一样降低温度）的能标称为“电弱对称性破缺能标”。

宇宙的降温类似于玻璃珠下降到瓶底。在标准模型中，某种等价于瓶底凸起的量子场对应物破坏了对称性，为 W 和 Z 玻色子引进质量，由此造成了两种力在强度上的区别。这个对应物就是希格斯场，或者更准确地说，布劳特–恩格勒特–希格斯场（BEH）。它将宇宙引向了不对称的基态，虽然相应理论仍是对称的。

即使模型有错误，W 和 Z 玻色子拥有质量的事实不会改变。而在 LHC 的帮助下，我们能够首次在高于电弱对称性破缺能标的区域研究物理。如果没有 BEH 场，标准模型在这些能量区域将失效，我们将因此进入真正的未知领域，而只能寄希望于能否找到一些关于质量起源或希格斯玻色子的线索。

在周日埃文斯和英斯的活动结束后，我和《卫报》科学记者伊恩 · 桑普尔（Ian Sample）一起主持了一个谈话会，关于他描述希格斯粒子搜寻历史的书《有质量的》（*Massive*）。伊恩的谈话结束后，观众问了一个类似“如果希格斯粒子是基本粒子、至关重要又无所不在，为什么它的寻找如此困难？”的问题。

这是一个很好的问题。我的回答是，在某种程度上，起作用的不是希格斯玻色子。真正重要的其实是充盈全宇宙、为 W 和 Z 玻色子以及其他基本粒子赋予质量的 BEH 场。如果你相信 BEH 机制的正确性，

那么每次测量基本粒子的质量时你都将发现一些证据。

另一方面，目前为止这纯粹只是事关如何解释，因为 BEH 理论虽然解释了质量起源，却没有为任何新现象作出可供实验验证的特别预测。或许还存在其他理论也可以解释质量起源。事实上，这也是彼得 ·希格斯有关此研究的第二篇论文初稿刚开始被《物理评论》杂志拒稿的原因。

他之后在论文中加入了一个方程，那个方程本质上就是说："好吧，如果存在这种场，你就可以在其中制造波，而这将表现为新的标量（即无自旋）粒子。"这些波（或者说量子激发态）不是戈德斯通定理所示的无质量标量玻色子，而是规范玻色子吃掉了自发对称性破缺后剩余的部分。它们同样生成了标量玻色子，但拥有质量。这就是著名的希格斯玻色子。这个方程也是我们为什么要找出希格斯粒子的原因。正是这个预测，让我们能够从实验上验证 BEH 机制究竟是漂亮的数学技巧还是自然界的运行方式。

2011 年 4 月 22 日，LHC 粒子束对撞的亮度超过了 Tevatron 对撞机在 2010 年确立的世界纪录。[①]强度（或者说亮度）是用来描述 LHC 上每秒发生多少次质子对撞的一种度量。[②]此处的单位是质子数每单位面积每秒。所以我们正以前所未有的速度获得实验数据。

如果存在希格斯粒子，那么我们正以极快的速度接近它。现在，LHC 对撞的数据源源不断地涌入我们的分析软件，而随着我们努力破解数据想要告诉我们的，紧张情绪在一天天积累。

---

① LHC 达到了 $4.67\times10^{32}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$，而之前 Tevatron 达到了 $4.024\times10^{32}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$。

② 参见"术语：截面和亮度"（第 73 页）。$4.67\times10^{32}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 对应于 4.67×10^{-7} 每飞靶每秒，或者 0.03 每飞靶每天（非常粗略的估计，取决于机器能够维持高效率运行多久，以及每一次运行后实验组再次填充粒子束的速度）。

第五章

传言和极限

（2011 年 4 月—2011 年 8 月）

5.1 为什么“凸起”意味着玻色子？

截至目前，LHC 在高能区域刚运行了一年多。我们都忙于分析实验数据，并急切而贪婪地搜集着更多数据。现在是时候介绍那些令我们忙得不可开交的所谓数据分布，并厘清“在诸如 ATLAS 的对撞实验中对某东西进行测量”究竟是什么意思了。

测量某种分布的主要步骤基本如下所述。

首先,你需要尽可能多地记录下有趣的对撞事例。“对撞事例”（通常简称“事例”）在此处指的是，在一个时间段内能够获得的所有与 ATLAS 探测器中相互穿越而过的两束质子团[①]相关的数据。从 LHC 运行至今，大约每 50 纳秒发生一次“对撞事例”，所以每秒将有 2000

① “团”（bunch）在此处不是指在句子“天啊，好大一团质子！”中所示的口语意思。它是一个专业术语，用法类似“LHC 现在正运行着 1404 团。”粒子束并非一整条连续均匀分布的质子流，而是一系列间断的质子团，对应于 LHC 中高频电磁波加速场的时间结构。每一个“团”只有几厘米长，里面大约包含 1000 亿个质子。

万个可能的“事例”发生。

大多数事例并不“有趣”，即当质子团互相穿越而过时，质子实际上并没有对撞。或者更可能存在的情况是，所有发生的对撞都是我们已经大量测量过的类型。我们拥有非常成熟的实时筛选算法（统称“触发器”），可以用来挑选出少数罕见的有趣事例。一些算法直接存在于硬件中——掉个书袋，例如专用集成电路（Application-Specific Integrated Circuits，ASIC）和现场可编程门阵列（Field Programmable Gate Array，FPGA）——而其他一些存在于软件中，运行在探测器附近的巨大计算机农场上。

来自质子团对撞处的数据抵达探测器的时间有先有后，特别是因为探测器太过庞大，以至于即使是以接近光速运动的粒子，从对撞点到达 ATLAS 边缘也要花费 80 纳秒时间。所以甚至在某个对撞处的粒子飞出探测器之前，下一个对撞处的粒子就已经向探测器飞来。之后就是从探测器中读取信息，将它们通过数据线传送到计算机农场。所有数据都必须加上时间标记[1]，而所有标记都必须准确无误，以保证我们能够重建某个事例的图像，即在某个质子团对撞处生成的所有粒子。在每秒发生的 2000 万可能事例中，大约 200 个事例会被保存。

然后，你需要“重建”事例。事例数据不仅储存在 CERN 中，也会被传送到一个遍布全世界的计算机网络里（即 LHC 计算网格），等待被重建。

重建过程包括确定粒子在跟踪探测器硅材料中的穿越点，执行模式识别（pattern recognition）以将这些点联结并画出粒子轨迹。这些轨迹将被拟合成曲线，以提取其中粒子的动量信息并反推出它们的起点。

另一部分重建代码将会识别热量计（大部分粒子终结于此）中的

① 巧合的是，负责 ATLAS 的跟踪器与其他一些部件相互之间以及它们与 LHC 之间时间同步的“定时接口模块”就是伦敦大学学院小组对 LHC 的贡献之一。

能量脉冲。通过分析脉冲信号，可以判断粒子更像强子（表现为较长、较深的能量喷射）还是像光子或电子（表现为较紧凑的喷射）。如果是后两者，能量有多大？是否有指向此能量的轨迹？由于光子不带电，所以不应该有轨迹，但电子有。诸如此类。

一些基本的重建过程可以直接由实时筛选算法完成，但我们可以利用最好的校准手段，慢工出细活，将工作完成得更彻底。

接下来，你需要整理之前记录和重建的事例样本。在这一步，你确实需要仔细思考一下，为了完成某个特定的分析，你需要测量哪种事例？在触发器筛选阶段，所有未经选择的数据都将永远丢失，所以失误就是错误。但在这一步，所有事例都已经保存，所以你可以尝试各种不同的筛选、优化以及再优化。举个例子，假设我们想要寻找希格斯玻色子衰变到两个光子的过程。对希格斯粒子而言，这是非常罕见的衰变（标准模型希格斯粒子发生此类衰变的概率小于 1%——具体数值取决于希格斯粒子质量），但我们能够以非常高的置信度高效地筛选出光子，异常精确地对它们进行测量。这些远远弥补了衰变的罕见性。

所以这里我们的目标是识别光子。重建结果能够告诉我们对撞中是否存在一些可能的候选者。希格斯粒子衰变生成的光子比其他大部分光子的能量都要高——光子是光的量子，而此处我们测量的光子比可见光的光子能量高约 10 亿倍。而且它们是“孤立”的，这意味着在探测器中，它们附近不存在其他类型的粒子。这一点很重要，因为另一种对撞中很常见的强子，即中性 π 子，也能衰变生成光子。如果只想寻找希格斯玻色子，这些就都是背景噪音。幸运的是，它们通常发生在强子喷注中，被其他强子所环绕，因而能够被排除出去。

还有另一件需要谨慎的事情：当质子团对撞时，很可能（几乎板上钉钉）会有多于一对的质子相互对撞。在某个质子团中，所有发生

对撞的质子对数据都会保存在一起，但这里我们只关心生成了我们的光子候选者的那个质子–质子对撞。原则上，我们可以移除其他东西，这既可以通过统计学知识（因为我们测量了其他对撞的性质，通常它们属于最小偏差事例，参见 2.2 节），也可以通过观测而分辨出一些粒子是否来源于不同的对撞顶点。但后一种方法对光子不起作用，因为光子不带电，所以不会留下任何轨迹，通常很难将它们确定到某个对撞顶点。

忽略这些细节,假设我们已经筛选出了含有两个孤立光子的事例，而且对光子能量和方向的测量做了校准。下一步是什么呢?

我们可以假设，这些光子是某个未知质量的新粒子衰变而成的独特产物。在这种假设下，我们可以计算粒子的可能质量。每个光子的质量为零，但它们的结合质量不为零。这是因为两个光子以极高的速度相互飞离，所以无论以何种方式测量它们，都将发现它们拥有大量能量。这里用到了狭义相对论。如果它们同向运动，那么原则上你总是可以追赶它们。而你沿着它们的方向运动越快，测量到的它们的能量就越小。[①]但如果它们相互飞离，追赶其中一个光子将会增加另一个光子的测量能量，所以不管你运动得多快，总是无法消除光子对的能量。根据能量等于质量乘以光速平方，这意味着光子对同样拥有质量。通常我们称这种质量为“不变质量”（invariant mass），因为这是一个可以测量、计算，又不依赖于你的速度的物理量。无论你是在追赶某个光子，还是坐在控制室中喝咖啡，测量到的光子对的不变质量都一样。而且如果光子对来自某个新粒子的衰变，根据能量守恒，它们的不变质量等于新粒子的不变质量。

之后我们可以做出数据的柱状图：水平轴是光子对的质量大小，

---

① 这是多普勒频移。光子的能量和波长发生变化，而速度（光速）保持不变。

我们将它切分为许多“长方形窄条”，每个窄条覆盖一小段质量区间。每当记录到一个事例，我们根据测量到的光子对不变质量将它放置在对应于那个质量的窄条里。通过这种方式，你将得到一个分布图，显示每个质量大小上拥有的事例数量。

即使确实存在希格斯粒子，大部分光子对也将来源于其他地方。除了希格斯粒子，还有许多其他过程同样能生成光子对（例如夸克的辐射）。此外，样本中还会存在一些假光子。不过，这些光子来源通常表现为光滑的质量分布——没有什么原理让它们聚集在某个特定质量附近。而另一方面，来自希格斯玻色子衰变的光子将聚集于某个质量上，所以在总体光滑递减的分布上表现为一个凸起。

随着时间推移，我们搜集到了越来越多的光子对。分布图中充满了假的、统计不显著的“凸起”。我们需要在这些东西面前保持冷静，继续埋头苦干，而不去理会外界渴望得到新闻而带来的紧张和压力（不仅全世界的粒子物理学家翘首以待，大众媒体也对此热切盼望，而后者对一个物理实验而言是非同寻常的）。

当我们搜集着更多数据时，我们也在尝试着各种方法以确信我们正确地测量了光子对的质量——校准和再校准探测器。如果发现了真正的凸起，我们有多大把握确信得到了正确的能量？或者，我们会不会因为将光子对分布到错误的质量上而漏掉了凸起？诸如此类的问题数不胜数，真是箭发于弦的紧张时刻！

5.2 狼来了

LHC 所在隧道的前主人是运行于 1989—2000 年间的大型正负电子对撞机（LEP）。LEP 实验完成了众多测量工作，确立了标准模型作为精确理论的地位。其中一些测量结果通过标准模型的精确计算框架，

隐约暗示了标准模型希格斯玻色子（如果存在的话）质量的大小。在LEP运行将近结束时，我们毫无意外地遇到了粒子物理发展史中一个激烈抉择点：我们应该按照计划关闭机器、启动LHC的建设，还是让它以最高能量再运行一段时间、观察希格斯粒子是否在机器的灵敏度极限处一蹦而出？

延长运行时间将花费大量经费，而且会推迟LHC的建造。但有一些迹象（真是讨厌的迹象）显示，希格斯玻色子有可能在质量约115 GeV的地方出现。虽然这些迹象只是几个暗示性的对撞事例，但LEP还是被允许延长运行了一个月，以观察是否有更多事例出现。完全没有！所以机器最终被关闭了。一些LEP物理学家仍然坚信他们已经发现了希格斯粒子，它的质量就是115 GeV。我有个同事以许多瓶香槟打赌它的存在，而另一个同事在一年之后的某个报告中仍然声称他们确实已经发现希格斯粒子——**完全**不是开玩笑。[1]激情有时会让人疯狂。

所以在数据不断累积而我们全神贯注于最新的（尤其是上节提到的双光子质量）分布时，某一时刻实验数据在115 GeV质量窄条上显示的一个小凸起令一部分ATLAS物理学家（其中很多是115 GeV"LEP希格斯粒子"的主要支持者）一股热血冲脑门（或者冲进部分骨骼中）也就不足为怪了。一份含有不严谨声明的内部记录在ATLAS合作组内广泛传播。很明显，那是一个过度夸张的声明，在我看来，缺少客观性。

这些都是轻易会犯的错误，但不应该轻易分发给成千上百的同事们。它本来应该是在几个朋友间传播的差错：这是内部评审机制的一部分，ATLAS会讨论这些结果，过滤掉那些似是而非的东西。但不幸

① 他后来成了LHC的一个领头希格斯物理学家，所以显然——识时务者为俊杰——叛变了。

的是，有人出卖了组织机密，将标题和摘要（以及内部作者列表，列出了那些抢先于其他所有同事采取行动的潜在诺贝尔奖获得者）发表在了博客上……

这件事的后果就是，CERN 的 ATLAS 实验组大部分人度过了一个比预想中要忙得多的复活节假期。

公众和媒体对寻找希格斯粒子的兴趣非常高涨。我们担心，如果有太多错误信息成为头条新闻，兴趣最终将被消磨而变成嘲讽。而当我们终于有结果要发布时，人们将会把它当成又一个“狼来了”的故事。另一方面，如果不作出回应，我们就失去了参与其中的机会。这将使我们看起来神秘兮兮，也会让那些不懂详情的人议论纷纷，以讹传讹。我本来准备尽可能无视这些传言，但当《第四台新闻》栏目打来电话时，我才意识到传言已经远播，我最好能替 ATLAS 作出一些回应。

我和克里希南·古鲁-穆尔蒂谈论了这件事。我向他解释这并非完全是欺骗，而是基于数据分析的传言。只是在所有人能够为之激动之前，它还需要通过层层科学审查。[①]它有可能在任何阶段被证伪，而鉴于现在它被公布的方式，坦白说，我倒希望它被证伪。如果通过了评审，它应该由 ATLAS 正式发布，同时投递给杂志。

那时候，我们能够确信的是，这些结果被夸大了。希格斯玻色子有可能出现在 115 GeV 的地方，但即便如此，那时候的数据也没有表现出明显的信号。这件事除了让作者们尴尬蒙羞、让泄密者良心不安外，或许也让媒体和公众明白了“官方结果”和“传言”的区别。当然，两者都有可能正确或错误，而给某个结果打上“官方结果”的标记也不意味着它得到了政策认可或通过了商品验收，或者任何其他在

---

① 参见 3.3 节“哥本哈根”。

政治党派或企业的语境中相应的意思。它其实意味着，由许多物理学家组成的合作组已经尽其所能确保结果是正确且被正确表述的，他们都支持这个结果。这是某个复杂结果必须通过的测试，是科学方法的应用。它并非万无一失，但相比传言要远远可信得多……

我觉得，这件事也让我们在和媒体打交道上获得了更多信任。科学家有时候对记者的看法太严厉。正如过去一样，CERN 现在是个充满奇迹的地方。新数据每时每刻都在产生，还有各种层次的合作和竞争，所以保持一种超然的科学态度有时候很困难。而如果连我们也不能一直保持清醒的头脑，科学界之外的人大惊小怪也就不足为奇了。我觉得，对于一些大惊小怪的头条新闻，我们应该更宽容些——当然，当它们在误导公众时，我们也不能放任不管。

评审是大型合作项目生活中会遭受的一种职业危害。从第一个想法到最终结果发布的路途困难重重，其中充满了陷阱、机关，以及令人精疲力尽的关于逗号和连字号的争论（常常一群疲倦而愤怒的人为此争得面红耳赤，而他们没有一个人的母语是英语）。但即便如此，即便有这些逗号和连字号的争论，评审依然至关重要。

与此同时，5 月又有一次“提速”会议，这次在美国普林斯顿举办。一切都很完美，而到那时为止获得的大量数据无疑更是锦上添花。我们对一些新的喷注次级结构变量进行了首次测量。亚当・戴维森和美国阿贡国家实验室（Argonne National Lab）的一个博士后莉莉・阿斯奎斯（Lily Asquith）展示了 ATLAS 的第一批结果。当时西班牙瓦伦西亚大学的博士生米格尔・比利亚普拉纳（Miguel Villaplana）实际上还展示了首次得到的极大提速的重质量粒子候选者的图像——两个顶夸克。

术语　　标准差、概率和置信度

为了能够对数据中某个凸起的重要性进行客观的判断，我们需要统计学分析知识和一致的标准。在粒子物理中，我们倾向于采用“标准差”（西格马，记为σ）来量化数据。

在此处，σ是确定高斯分布（正态分布）宽度的一个参量。高斯分布是一条钟形曲线，广泛见于各种实验，因为测量结果通常包含许多独立的误差来源。如果测量次数足够多，所得结果的分布在考虑那些独立和随机误差的情况下将满足高斯分布。[①]它的宽度由σ即标准差决定。

现在，考虑一个理论模型（例如上节提到的双光子质量分布）和对模型的测量结果，即实验数据。如果分布图上有个明显可见的凸起，我们就可以用σ来量化凸起的显著程度。在由多次测量得到的高斯曲线中，68%的测量数据位于中心值附近一个σ内，95%的数据位于两个σ内，而99.7%的数据位于三个σ内。所以如果我们估计了σ的大小（误差分布的宽度）并发现某个数据点在背景模型的三个σ之外，那么从表面上看，这个数据点应该属于不在三个σ内的0.3%数据。换句话说，这个数据点由背景模型提供的概率只有千分之三，它很可能代表着背景模型之外的新东西。

三个σ的结果看起来已经足够令人激动。事实上，按照惯例，“三个σ”的结果通常被认为已经足够显著，可以称之为证据（evidence）。但还是要谨慎。如果你进行了一千次测量，只要其中的三次测量就可以造成三个σ的效应，即使它单纯只是数据中的背景噪音。这种所谓“到处搜效应”（look elsewhere effect）也要被估计，考虑进置信水平中。粗略地说，需要五个σ的结果才可以宣布有了真正的发现（discovery）。这相当于说，你的“发现”属于背景涨落而非新物理的概率只有二百

① 这就是“中心极限定理”。

万分之一。

在科学的其他一些领域，人们习惯于采用概率或者“p值”。虽然有时候我们也采用它们，但粒子物理学家看起来确实更喜欢用σ。

5.3 Tevatron 发现了凸起

在“分布图中找凸起”游戏中，LHC不是唯一的参与者。费米实验室Tevatron正负质子对撞机的CDF实验组找到了一个凸起。此凸起实际上通过了他们的评审，被公开发布[①]，并被杂志接受发表。这引来了一阵骚动以及一次特别的研讨会。在科研中，研讨会比非官方泄密普遍得多。这个结果(a)如果被确认，将是非常重要的结果，(b)在大家都接受这个结果之前，需要通过正式确认。

他们对生成了一个W玻色子（随后衰变生成一个电子或μ子，以及一个中微子）和两个强子喷注的对撞事例进行了测量。之后他们计算了喷注对的不变质量。在约150 GeV的质量上，事例数量比标准模型预测的值要多一些。

此类凸起可能预示着生成了某个新粒子（类似W玻色子，但质量约为它的两倍），再衰变生成两个喷注。已知的科学中并不存在这种粒子，所以它有可能是大发现。虽然它并不符合任何已有理论，但仅仅过了一天，就出现了好几篇新的理论论文试图对其进行解释。它有可能代表着我们对基础物理认识的大突破，虽然真正理解它还需要很长一段时间。

当然，还有许多原因让我们必须谨慎。首先，在统计学上并不能完全排除它只是个偶然事件。那篇论文声明，凸起是偶然事件的概率

① 参见：http://arxiv.org/abs/1104.0699.

是万分之一（0.000 1）。虽然这是个很小的数，但别忘了，我们会画出大量与此类似的分布。如果我们得到一千个不同的分布，你在某个图中发现凸起只是偶然事件的概率就变为十分之一（0.1），虽然这仍然是个很小的数，而且我也不能确定是否真能得出跟这个分布同样有趣的一千个不同的分布。

还有一个需要谨慎的原因。即使不考虑统计不确定性，实验数据与理论预测也无法做到完全精确。例如，喷注能量的平均误差为 3%，它来自系统不确定性。一般而言，系统不确定性的计算比统计不确定性困难得多。如果喷注的能量范围有 3%的起伏，这将意味着，有一定的概率所有喷注的能量都出现 3%的误差。

如果是统计不确定性，3%的误差就有可能成为“一个 σ”的不确定性，即 68.2%的测量数值都分布于实际数值最多误差 3%的范围内。[①] 但对于系统不确定性，情况并非如此。例如，它们有可能统一偏大 3%。但要说出这种可能性有多大同样非常困难。在统计不确定性中，如果 3%是“一个 σ”，那么有 68.2%的概率，测量结果与实际结果的误差在 3%之内。如果误差是正态分布的，那么两个 σ 的位置，即 95%数据的误差范围，将是一个 σ 的两倍，即 6%。但对于系统不确定性，误差不太可能是正态分布的，所以很难给结果分配概率。CDF 考虑了种种此类因素，估计出凸起是假信号的概率将因此提高八倍（当然，仍然只有 0.0008）。

Tevatron 上的另一个实验 D0（D-零）之后也做了测量，但如同 ATLAS 和 CMS 一样，什么也没有发现。CDF 最后对更多数据进行了新的分析，也没有重现之前的结果。所以正如希格斯粒子的传言，这次大概也是某种差错。希格斯粒子的传言之前没有经过实验物理学家

---

① 参见“术语：标准差、概率和置信度”（第 141 页）。

（我和 ATLAS 的同事）的评审，但最终还是败在我们手上。而 CDF 的结果通过了合作组和杂志的评审，又经过了更高质量的分析。但即便如此，它仍然不可重复，几乎已经被塞进了名为“假信号”的文件夹里。

然而，我们有必要重温这些失败经历。这会让我们意识到我们所承受的紧张和压力。这也将提醒我们，在 ATLAS 和 CMS 之间一直进行的相互验证和研究是多么重要，我们必须确保任何关于希格斯粒子搜寻进展的结果在公布之后不会被撤回或反驳。但最重要的还是保持开放性和可重复性。

让第三者核查你的结果，他会发现一些你发现不了的东西。误差可能来自粗心大意、主观臆断或者仅仅只是垃圾代码。粒子物理几乎不涉及任何商业利益（虽然这些失败肯定会让你的职业生涯岌岌可危）。但在科学的其他领域，例如新的治疗方法或药物对人类治疗效果的研究，结果将事关生死。令人惊讶的是，许多有关医疗保健的决定（例如是否颁发某种新药物的生产许可证）完全基于一些永远不会公布的数据。即使是基于严格可靠的分析数据，结论也有可能错误，不能毫无保留地接受。它们必须经过其他独立科学家的评审，理论上说，还要经过重复验证。这不仅仅是因为他们可能不诚实（当涉及巨额投资时，只有太单纯的人，才不会考虑到这种可能性），更因为如果不向外部评审公开分析过程，他们可能酿造的无心之错将永远不会被发现。相似甚至更糟的顾虑之前也有发生：某些人利用诽谤法的空子打压别人对分析数据和结论的质疑。不管怎样，钱白白被浪费，受苦的只有人类自己。

评审员也是夜间好梦的守护神。我最早写的论文中有一篇是关于光子–质子对撞时强子喷注生成比率的测量，利用了 ZEUS 探测器搜集到的数据。我自己制作了论文中的数据图，使用了自己的代码。我注

意到，从原始数据到我的结果，中间经过了非常多的步骤。我同样注意到，另一个实验（H1）的物理学家很可能会重复我的工作。而当获得更多数据后，他们可以进行更精确的测量。所以如果我在其中出了任何差错，最终都将被他们曝光。然而，我们是吃螃蟹者。在我们测量之前，没有人知道答案。

在数据分析的开始阶段，我隔三差五就找出一些将导致结果巨大差别的错误。不过最终事情还是被解决了，出现差错的空间也变得更小。最后，我开始核查误差条中的一些小问题。这些都是非常微小的问题，虽然仍有一些差错，但不会对分析结果产生关键影响。

即便如此，在论文发表前的一两个星期，我还是经常在深夜中惊醒，担心自己还漏掉了一些检查。唯一能让我感觉（相对）心安的事情是，其他人也独立地得到了最终的数据图。在 ZEUS 中有个规则，任何待发表的结果都必须经过至少两个独立小组的分析。事实上，“第二个分析员”和我通过相互比较各个不同步骤的结果，发现了彼此分析中的许多错误。而我们两人同时犯了相同的重大失误而导致最终结果出现巨大差异的概率微乎其微。所以我无须如此焦虑，可以继续睡觉——但醒来之后还得继续核查。

不管怎样，我们是对的。那篇论文[①]是我的一个骄傲，它在理解光子、质子和强相互作用上迈出了巨大的一步。

这种行为的核心关键是：你是想知道答案，还是想将自己的观点强加给大自然？在任何科学领域（在工程领域则更甚），你最好选择忠实于正确答案。大自然不会因你的错误而受影响，但有人可能因此丧命。找到一个本非我愿的正确答案或许令人稍感挫折，但强行推广一厢情愿的错误将导致毁灭性的结果。

---

① 参见：http://arxiv.org/abs/hep-ex/9502008.

我觉得，科学与政治之间的一条断层线就是这种动态过程在政治中表现得较不明晰。不管他们心存何种偏见，政治家都无法改变诸如二氧化碳排放量、强奸或疫苗接种这些结论背后的科学。但当言及有关经济和社会的结论时，或许他们可以改变。说服人们储蓄或者消费可以改变经济，而说服人们支持或反对医疗改革方案可以改变社会。无怪乎有时候政治家、说客或医药公司经理难以把握这条断层线究竟在哪里。

在即使可能起作用的地方，通过说服的方法改变现实也效果不一。但无论如何，它在政治中发挥作用的概率要远大于在物理中。不管你对量子力学和观察者效应作何想法，千万不要试图说服引力给你放一天假。

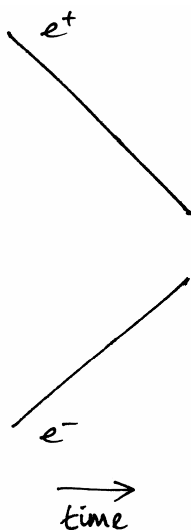
术语 费曼图

费曼图是粒子物理学家的得力助手，也是令他们咬牙切齿的仇人。当我在此书中描述各种物理过程时，大部分时间我都会在心中想像出它们的费曼图。很快（实际上，就在下一节）我就会真正画出一些费曼图进行讨论。所以现在是时候聊一下为什么它如此绝妙——以及为什么它需要被谨慎对待了。

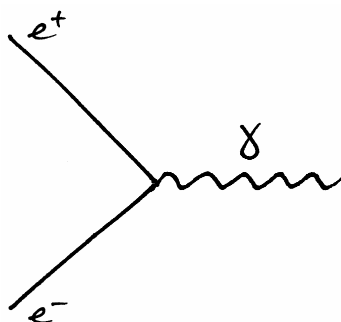
费曼图是实际方程的图像表示，这些方程可以用来计算一个或多个粒子从一个态到另一个态的量子力学振幅[①]。初态可以是 LHC 中质子内的一对夸克，而末态原则上可以是任何东西。举个简单的例子，我将初态定义为 LEP（比 LHC 早一个年代占据着隧道的加速器）上对撞的电子和正电子，而末态定义为一个μ子和反μ子。

首先是电子和正电子登场（时间轴从左往右）：

① 参见 3.3 节“哥本哈根”。

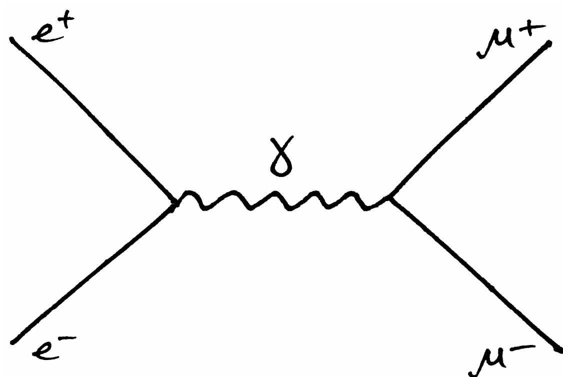


在费曼图中，每个入射粒子都用一条线表示。相应地（虽然我没有直接写出来），它们在方程中也有对应项。现在让电子和正电子对撞，湮灭生成一个光子：



三个粒子相遇的顶点在方程中也有对应项。在此例子中，这个对应项非常简单——它就是电子电荷量。顶点代表着电磁相互作用，而相互作用发生的概率依赖于电荷大小。

光子持续存在一段时间，之后通过另一顶点衰变，这次依赖于μ子的电荷量（恰好和电子的电荷量相等）：



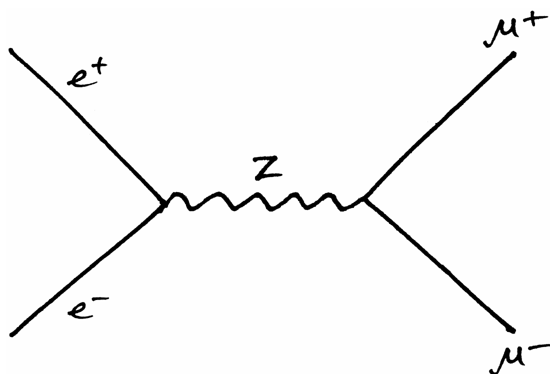
在方程中，每个末态粒子（μ子和反μ子）也都有对应项。同样，代表光子的波浪线在方程中也有对应项，这条内线就是“传播子”。它被称为“虚”粒子，因为虽然它对振幅计算非常重要，但永远不会直接出现在末态，所以在某种程度上，它不是真实的粒子。由于是虚粒子，所以它的行为可以很诡异。例如，虚粒子的质量不需要和它对应的真实粒子质量相同。虚光子的质量不必为零——事实上，在 LEP，它的质量无法为零，因为它必须处于静止状态，又必须携带大量能量，所以根据老朋友 $E=mc^2$，它的质量必定大于零。

为了计算此过程发生的概率，只需将振幅平方，再乘以描述入射电子和正电子数量的项（入射流）以及可能存在的末态构型数量的项（相空间）。实际上并不复杂，而且费曼图为此过程提供了一个直观的、斯诺克球似的表示。

但且慢！因为此处正是需要谨慎的地方。

费曼图代表着振幅，而在将振幅平方得到概率之前，你需要将所

有可能振幅叠加。在前面的讨论中，我们漏掉了一种可能性。中间过程不仅可以出现虚光子，也可以出现Z玻色子，如下图所示：



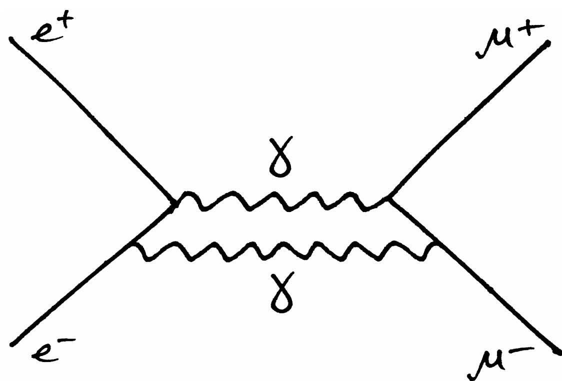
由于初态和末态不变，所以这种可能过程对应的振幅也需要叠加到之前含有光子的振幅中，以得到总振幅。事实上，在LEP中，由于对撞的设计能量等于Z玻色子的质量（因此Z传播子拥有正确的质量），所以含有Z玻色子的振幅远大于含有光子的振幅。

为了得到最终结果，我们将两个振幅相加再平方。代数操作的顺序（先相加再平方，而非先平方再相加）至关重要，因为这就是量子力学波动性起作用的地方。若将第一个振幅（含有光子）记为 P，第二个（含有Z玻色子）记为 Z，两者相加记为 T，即 $P+Z=T$，则概率 T^2 就等于 $(P+Z)^2$。如果我以错误的顺序计算，先将两个振幅分别平方再相加：$T^2=P^2+Z^2$，则结果将不同。如果你知道振幅并非一定是正数，你就能马上意识到这两种不同结果的区别。假设 $P=2$，$Z=-2$。以正确的顺序计算，结果将是 $T^2=(2-2)^2=0$。这是两个振幅相消干涉的一个例子。如果以错误的顺序计算，则结果将是 $T^2=2^2+2^2=8$。

如果将费曼图当成真实描述物理过程的斯诺克球似图像，你将永远得不到干涉效应，永远得不到为零的答案。你忽略了相互作用的量

子本性，所以无法准确描述数据。

最后再讲一个这些绝妙的图像中隐藏的变数……其实我们还需要再叠加上其他一些振幅。例如，没有什么物理原理阻止两个光子间的交换，如下图所示：



所以我们同样需要叠加上这个振幅。事实上，还有无穷多越来越复杂的费曼图可以存在，原则上它们都需要被叠加。我们之所以能够从无穷多费曼图中解脱，只需要计算少数几个，是因为每个新顶点（即图中三个或四个粒子相遇的点）在方程中对应的数非常小。因此，费曼图越复杂（顶点越多），它的重要性就越小。这意味着，只要计算少数几个简单的费曼图，就能得到非常精确的答案。而更复杂的费曼图只会对结果进行微小的修正。①

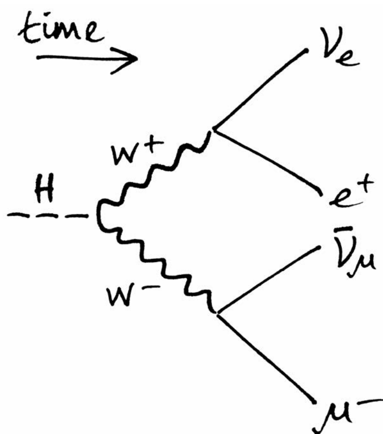
这就是费曼图：一个简单明了而又不可或缺的工具，非常直观实用，但若不谨慎对待，则会变得靠不住。即使是最好的物理学家，偶尔也会在费曼图上栽跟头。

---

① 这属于微扰理论，参见 6.2 节“微扰理论：我们是否掩盖了新物理？”。不过，微扰理论并非总是有效的。

5.4 W 玻色子和 WW 玻色子对

2011 年夏天，LHC 的实验数据开始显示出一种效应的存在，它或许将是确认（或者否认）希格斯玻色子存在的第一个迹象。这种效应主要和质子–质子对撞生成的 W 玻色子对的数量有关。这些额外的 W 玻色子对或许是希格斯玻色子通过如下过程生成的产物：



一个希格斯玻色子衰变生成一个 W^+和一个 W^-，之后两者再衰变生成轻子（参见“术语：费曼图”，第 146 页）

这种过程能够发生的想法非常诱人，但毋庸置疑它还伴随着许多不利因素，既有来自统计的，也有来自系统的。

如果希格斯玻色子拥有足够质量（因为 $E=mc^2$，这等同于静止时拥有足够能量），它将迅速衰变生成一对 W 玻色子。所以如果存在希格斯粒子，额外的 W 玻色子对将是最早发现它的一种途径。

然而，和希格斯粒子衰变生成两个光子的过程不同，衰变生成的 W 玻色子不会在数据图上形成凸起。一般而言，如果能够测量衰变产物的能量和动量，就可以重建原始粒子（此处即希格斯玻色子）的质

量。然而不幸的是，此处考虑的 W 玻色子将衰变生成一个电子或 μ 子，再加上一个中微子。电子和 μ 子可以精确测量（通过内层的跟踪探测器、热量计和 μ 子系统），但对中微子我们无能为力。中微子几乎不和任何东西相互作用，包括我们的探测器。为了感知中微子的存在，你需要远大于 ATLAS 且更致密的探测器，还需要数以亿计的中微子。所以我们无法发现中微子。被它们携带走的部分动量（系统中消失的动量）是它们存在的一个线索，但消失的动量无法帮助我们重建希格斯粒子质量的凸起。

这就是我们观测到的额外粒子很容易受理论不确定性影响的一个原因。你不需要理论告诉你在分布图中是否存在凸起。如果分布图中有一个明显的凸起，那里很可能存在一些东西，而不管理论物理学家如何解释。但我们无法重建凸起，所以只能记录 WW 对的数量，看它是否超出我们的预期。理论告诉了我们预期值，但也伴随着误差。

大约在 6 月 14 日午夜，ATLAS 和 CMS 实验组跨越了一个主要的里程碑，这比原计划提前了半年。运行加速器的科学家在年初给他们自己设立的目标是，在 2011 年给实验输送 1 个每飞靶的累积亮度，而累积亮度决定了实验能够记录的质子–质子对撞数量。鉴于大多数粒子物理学家表达情感的方式，我们在次日的项目状态报告中加了一张香槟的剪贴画以庆祝目标的提前完成。

这个数字在物理上并没有特殊意义，算是很任意的一个里程碑。但在上一年所做的大多数研究和规划都采用了 1 个每飞靶作为“基准规划”，所以大家都明白，我们可以利用这些数据完成很多物理研究。而且，加速器仍在以极大的速率输送着质子束。

巧合的是，ATLAS 关于希格斯粒子搜寻的第一篇论文[1]也在那天

---

① 参见：http://arxiv.org/abs/1106.2748.

发布。虽然还没有希格斯粒子存在的信号，但显然我们已经很接近了，而 WW 衰变模式将在其中起到关键作用。

5.5 与此同时，在中微子领域

即使在 2011 年，粒子物理也并非只是强子对撞机。

在日本仙台市以南一百多公里的地方有两个主要的粒子物理实验室。日本质子加速器研究设施（Japan Proton Accelerator Research Complex，J-PARC）就在茨城县东海村的海岸线边上，那里的加速器将中微子束传送给 295 公里以外神冈的超级神冈探测器。这就是 T2K 远距离中微子实验。

中微子束首先在 J-PARC 进行测量，这离它生成的地方非常接近。（中微子可以通过将质子猛击到一大团东西中生成。当然实际情况比这复杂得多，但这是最基本的操作。）之后中微子束几乎毫无阻碍地穿越地底岩石，抵达 295 公里之外的超级神冈探测器。后者是一个深藏地底 1000 米矿井中的巨型容器，盛有 50 000 吨的水，被约 13 000 个光电倍增管包裹。一些中微子将在此发生相互作用。

在标准模型中，中微子和反轻子一同产生。后者也可以是反中微子或带电反轻子——正电子、反 μ 子或反 τ 子。当中微子和带电反轻子一同产生时，它们就被相应标记为电子中微子、μ 子中微子和 τ 子中微子。这些标记称为“味”（flavour）。同样地，当和超级神冈探测器相互作用时，它们主要生成电子、μ 子和 τ 子（都是轻子）。所以当中微子经过了漫长的旅途后，你也可以同样标记它们。

然而，中微子拥有质量。而在它们的漫长旅途中，质量其实很重要，因为它决定了中微子能量和动量的关系。如果将中微子看成波动（此处它们确实应当作为波动对待），质量就决定了它们的波长。

不同寻常的是，质量的标记（记为 m_1、m_2、m_3）和味的标记（电子、μ 子、τ 子）并非一一对应。当中微子传播时，波长随之周期变化（因而每个质量标记也随之周期变化），而由于每个轻子标记由不同的质量标记混合而成，所以中微子传播时会在不同的轻子标记间振荡。因此，你在超级神冈探测器上看到的轻子标记和在 J-PARC 上看到的并不需要一样。

中微子振荡的现象之前已经测量过，它是我们推断中微子质量不为零的理由。在原始的（1998 年之前的）标准模型中，中微子的质量为零。物理中有个未解之谜，称为"太阳中微子问题"。这个问题可以追溯到 1960 年，起源于雷・戴维斯（Ray Davis）和约翰・巴赫恰勒（John Bahcall）领导的霍姆斯特克实验（Homestake experiment）所做的开拓性测量工作。位于美国南达科他州某个矿井中的探测器测量了来自太阳的中微子比例，并且将之和理论预测（基于我们已知的太阳内部核反应过程知识）相比较，结果发现测量到的中微子少于理论预测。人们提出了各种解释，包括质疑实验本身有错误（因此实验又被其他独立的技术重复进行了许多次），或者我们对太阳的认识有错误。没有人在巴赫恰勒模型中发现问题，而一个耸人听闻的可能性开始被提出。中微子和光子都在太阳内部生成，而它们的数量取决于太阳核心的核反应速率。太阳内部生成的光子在穿越太阳等离子体的过程中不断被散射，所以花了数万年才逃逸出太阳。而由于中微子和太阳等离子体的相互作用非常微弱，它们几乎瞬间逃逸了出来。所以关于中微子消失的一个可能解释是，太阳已经进入了衰老期，我们现在看见的阳光其实是数万年前核反应过程的产物，而目前的核反应过程已经非常缓慢甚至停止。如果确实如此，则现在的太阳将处于很不稳定的状态，我们过一天就少一天。

不过，另一个最终被认为是正确的解释让我们松了一口气。霍姆

斯特克实验只测量了电子中微子。如果在太阳到地球的漫长旅途中，中微子可以转化为 μ 子中微子和 τ 子中微子，则太阳生成的一些电子中微子在抵达地球时将变成 μ 子中微子和 τ 子中微子，它们不会被测量到，这就解释了中微子的缺失。而只有当至少某些中微子拥有质量时，才会发生中微子振荡。所以戴维斯和巴赫恰勒是对的，太阳物理也没错，是标准模型错了。

在 1998 年，研究有了突破性进展，因为超级神冈探测器测量了宇宙射线撞击大气层时生成的中微子之间的中微子振荡现象。另一个更直接的验证来自萨德伯里中微子天文台（Sudbury Neutrino Observatory）。这是一个位于加拿大安大略省的巨型储水池，盛满了重水。它利用了不同的技术对来自太阳的所有中微子进行测量，而不管它们属于哪种类型。结果完全符合太阳模型的预期。

从那时开始，利用加速器和核反应堆生成的中微子束，人们能够越来越精确地测量中微子振荡。第一个进行此类研究的加速器实验是美国的主注入器中微子振荡搜寻（Main Injector Neutrino Oscillation Search）或 MINOS（非常棒的缩写，它也可被解读为 Minnesota-Illinois Neutrino Oscillation Search，因为中微子束是从伊利诺伊州的费米实验室发射到明尼苏达州的苏丹矿井）。日本的 T2K 是这些实验升级的一部分。

在 2010 年巴黎 ICHEP 会议上，美国科罗拉多大学的埃里克·齐默尔曼（Eric Zimmerman）展示了一些来自 T2K 实验的首批中微子事例。人们一边搜集更多数据，一边分析已有数据，其他人都在翘首以待结果的到来。然而，2011 年 3 月，就在一个准备公布 T2K 首批中微子振荡结果的研讨会举办之前，一场毁灭性的大地震袭击了仙台市。事实上，全球各地本来已经有一系列相关研讨会准备举行。实验室遭受了严重破坏，甚至有一段糟糕的时间，KEK 和 J-PARC 这两个大型

高能物理实验室的所有网页和邮箱地址都不可访问。虽然 T2K 中微子实验大厅的所有人都安全撤离，但全球各地的研讨会也全都延期举行，以便日本能够第一个公布结果。最终在 6 月，结果得以公开。T2K 发现了 μ 子中微子转化为电子中微子的迹象。

标准模型可以被修改（而且确实被修改过）以便容纳中微子质量，但这并非小修小补。这是“标准模型已死–标准模型万岁”的一个实例。由于这是一次巨大的修改，所以人们也花了相当长时间才完全接受改变。时至今日，我在审阅一些博士生毕业论文时还会发现引言部分写道：“在标准模型中，中微子质量为零……”

在 1998 年之后的标准模型中，中微子振荡的方式可以由一个含有三个角度的矩阵定义。截至 2011 年，其中两个角度已经被许多实验测量过，包括美国 MINOS。但第三个角度仍然未知，而且实际上，它可以为零。T2K 发现了一些它不为零的迹象（在几个 σ 内）。如果结果得到确认，这将是大新闻！

这个问题不仅仅和中微子有关。在大自然中，所有基本的物质粒子都以三份（或者说三代）的形式出现。类似中微子，夸克也有三代。每一代的质量都递增，所以 μ 子的质量比电子的大，而 τ 子的质量更大。类似地，顶夸克的质量比粲夸克的大，而它们的质量都比上夸克的大。

而且我们同样（从 LEP 中 Z 玻色子衰变的测量）知道，如果存在多于三代的粒子，它们将非常非常重——即使是中微子。否则它们将表现出其他异样的性质。看起来，大自然中的粒子只会以三代的形式出现。但标准模型并没有预言这种现象，只是看起来似乎应该如此。

这确实很奇怪，而且关系着物理中的一个未解之谜——所有反物质都在哪里？日常所见的各种物质、每个原子几乎都只由第一代粒子构成（上、下夸克和电子），而另外两代粒子似乎就是多余的。而这预

示着某个更深刻的理论。**最少**需要三代粒子，就可以让物质有别于反物质。将三代或更多代粒子混合，就可以出现这种区别，但混合两代或仅仅只有一代没有用处。实验显示，此类混合以及物质–反物质不对称确实会在夸克之间发生。尚不清楚的是，这些现象是否也会在中微子之间发生？再说之前的混合角：如果第三个角度为零，则不会发生此类现象，因为我们只有双向混合。只有当第三个角度非零，物质–反物质不对称才会和夸克一样在轻子之间出现。鉴于我们都由物质而非反物质构成，这种不对称非常重要。为什么宇宙只由物质（至少在我们可观测的范围内）而非反物质构成是物理学和宇宙学的一个未解之谜。而在夸克相互作用中观测到的物质–反物质不对称似乎太微小，以至于无法完全解释宇宙的情况。所以如果中微子之间也存在某些不对称，这种现象本身将成为物理的一个重要的新方法，而且它或许也能为理解物质和反物质之间的关系提供一些线索。

总之，观察中微子是否从三个方向混合还是仅仅部分混合是首先要做的工作，因为这是标准模型中物质–反物质不对称发生的必要条件。截至目前，T2K 的结论是它们很可能在三个方向混合，虽然不确定性仍然太大以至于无法断言。与此同时，中国和韩国的物理学家正在用核反应堆进行相关研究……详情后述。

5.6 量子场和失踪的名言

我受邀请在 6 月 7 日主持一个 CERN 研讨会，内容是关于 ATLAS 上喷注的测量。每次主持研讨会，我都能学到一些新东西，即使听众仍然云里雾里。这一次我学到的一件事情是，并非所有东西都可以在万维网上找到。当然，实际上我早已认识到这点，但这回又一次提醒了我。

喷注的测量让我们知道了许多关于强力（将原子核束缚在一起的力）的知识（QCD）。我们之前反复提到 LHC 可能发现“新物理”，实际上通常我们想说的是新粒子或新的作用力，或者更新奇的东西，例如时空的额外维度。然而，即使是已知的作用力，我们也有许多想要知道的新物理，尤其是关于强相互作用的。

总的来说，强力非常复杂。它能产生一些利用现有技术根本无法（至少非常困难）预测的结论。虽然通过 QCD 采用各种不同的方法进行计算，我们可以很深刻地理解诸如强子质量、夸克和胶子在强子中的分布方式等，但它们都需要借助实验输入。然而，原则上我们应该能够只从理论上推导出这些东西。推导过程之所以复杂到难以进行，完全是因为相互作用太强。强耦合相互作用量子场论的这些固有性质非常复杂而有趣，值得我们花时间研究。

我想起了一句将近十年前在某次讲座中引用过的名言，它出自马丁努斯·韦尔特曼。韦尔特曼和杰拉德·特·胡夫特由于他们在基本作用力上的研究工作而获得了 1999 年的诺贝尔物理学奖。这句名言大致如下：

> 如果大型强子对撞机发现了希格斯玻色子和超对称，大自然将失去一个强迫我们研究强耦合相互作用量子场论的绝佳机会。
>
> ——诺贝尔物理学奖得主马丁努斯·韦尔特曼（疑似）

这里他想说的是，如果只用 LHC 就能发现希格斯玻色子和超对称，那么目前用来研究量子场论的技术就“已经足够”用来研究它们。但如果没有发现希格斯粒子，很可能出现的一个结果是，甚至弱力和电磁力都会变得很强，因此它们在 LHC 能量范围内也难以研究。在这种情景中，如果我们想要理解某些东西，深化我们对强力的理解将是至关

重要的前提。

当然，我在研讨会中传达的观点是，无论怎样我们都需要深化对强力的理解，因为我们已经知道，有一种基本作用力非常强。

我想要再次引用那句名言，所以就到网络上查找它的出处，就像你们经常做的那样。我知道，那些句子可能并非完全准确，所以我采取了最常见的查询技巧，用了各种不同的词语组合在谷歌中查询。可是一无所获。

在绝望之下，我开始查找自己的讲稿，因为我确信曾经引用过那句名言。为了进入网页，我绞尽脑汁想起了早就不用的旧密码，最终下载到了自己的幻灯片。可惜，其中只有一句类似的名言，跟着如下注释：

> 改述……早上没有找到准确出处。
> （约翰·巴特沃思十年前就这么草率了）

见鬼！

我记得，那次讲座之前几个月，我在阿姆斯特丹的荷兰核物理和原子物理国家实验室（Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge-Energiefysica，NIKHEF）与韦尔特曼有过一面之缘。由于他来自那个实验室，所以那里正在为他获得诺贝尔奖举办庆祝派对。恰巧，我正在那里主持一个研讨会，而苏珊娜也过来和我度周末，我们被邀请参加了派对。我们喝了很多香槟，而且大概还有些追星心理，又被苏珊娜怂恿，所以我让这个伟大的物理学家在我的《阿姆斯特丹旅游指南》上签名。我觉得，有可能是我在那次派对上直接从他那里听到那句名言。如果确实如此，我只能希望我的改述没有错误。不管怎样，它的含义并没有错，所以我在 CERN 研讨会上又引用了它。

5.7 排除范围：玻色子的反击

随着 2011 年夏天会议季的火热进行，大型强子对撞机继续传递出海量（或许应该说靶量）数据。我们不断提醒人们，不要听信任何非官方的泄密，因为那些结果都尚未接受评审。当然，这只会让人们更加急切地期待准确、官方的结果，反而增加了我们的压力。看似混乱但有组织的数据分析、相互核查、评论以及审核通过等活动不分昼夜地（字面意思，因为 ATLAS 是一个横跨许多时区的合作组）进行着。这并不只是关于希格斯粒子的结果，还包括其他可能事物的搜寻，以及对撞中实际发生过程的测量。后者占据了我的大部分时间，因为那正是我所协调的实验组的任务。

虽然我完全沉陷在那些测量工作中，但还是没有忘记关注希格斯粒子搜寻进展。事实上，我的小组所做的一些测量（例如 WW 玻色子生成的测量）将为搜寻工作提供不可或缺的相互校验和数据输入。最终，我们为参加下一次大型会议准备好了结果——这回是在法国格勒诺布尔举办的欧洲物理学会（European Physics Society，EPS）高能会议。

和许多科学家一样，我对偏差很不放心。如果我们怀着美好的愿景，尽自己最大的努力，设计了一个实验寻找正确答案，但却由于主观偏差而得到错误答案，这简直就是噩梦！这对任何实验而言都是如此，而对 LHC 这样的超大型实验和希格斯玻色子是否存在这样的重要问题，就更加明显了。

当我获悉了 ATLAS 的结果，在它未被公开之前，我写了一篇评论文章。当然，我在结果公布之后才将文章发表，以免剧透。之所以提前写了文章，是因为结果公布之时，我们也将获得 CMS 的独立结果。而我想在不受 CMS 数据影响的情况下表达对自己数据的看法，

否则 CMS 数据会像考试小抄一样误导我。当时，我写了如下文字：

> 现在是周三晚上，刚刚结束了一整天的讨论，关于将在 EPS 会议上展示的 ATLAS 结果。它包括了我们的希格斯粒子搜寻结果。我只能在周五公开这些结果，这也是你们无法在那之前看到这篇文章的原因。但是有一个理由让我提前写下这篇文章，看到最后你就会明白了。
>
> ……根据已分析的数据推测，我们预期应该可以排除质量在 130—200 GeV 之间以及在 320—460 GeV 之间的希格斯玻色子。如果确实如此，这将把之前得到的排除范围大大拓宽，而进一步压缩了希格斯粒子的存身范围……当然，这些分析都是建立在不存在希格斯粒子的前提下。
>
> ……数据真正告诉我们的是，我们已经以 95%的置信度排除了质量在 155—190 GeV 之间以及在 295—450 GeV 之间的标准模型希格斯粒子。其中一些区间之前已经被 Tevatron 实验排除，但这次仍然是个巨大进展。事实上，在 290 GeV 附近我们做得比预期“更好”，当然，这也可能只是数据的随机涨落的功劳。
>
> 但 155 GeV 是个更引人注意的地方。在此以下的区域，我们做得不如预期好。
>
> 这意味着以下三种情况之一：
>
> (1) 我们不太走运，背景中某个总体偏大的随机涨落干扰了灵敏度；
>
> (2) 我们做错了某些东西，因而尚未发现希格斯粒子（虽然结果通过了 ATLAS 合作组的评审，但它们仍然只是初步结果）；

(3) 希格斯玻色子（或者其他类似粒子）正躲藏在 155 GeV 以下的某个地方，等待我们去发现。

我现在写下这些东西，是为了能够在获悉 Tevatron 实验或我们的 LHC 伙伴 CMS 实验的结论之前表达我对我们数据的真实想法。当你们看到这篇文章时，我很可能已经知道它们的结果。但在这篇文章中，你可以读到我在不受任何其他实验诱导的情况下，对我们所得结果的意涵的判断。

如果在 EPS 会议上，其他实验组给出的排除范围涵盖低于 155 GeV 的区域，那将意味着 ATLAS 不够走运（或者做错了什么），而希格斯粒子可存身的空间更小了。

如果它们并不预期它们给出的排除范围能够涵盖低于 155 GeV 的区域，那将意味着在这个区域内，它们的灵敏度不够，无法对 ATLAS 的结果加以评论。

如果它们和我们一样，本来**预期**排除范围涵盖低于 155 GeV 的区域，但实际上并**没有**做到，那么这将成为希格斯玻色子被人发现的概率增加的首个迹象。

虽然并非定论，但只从 ATLAS 的数据来看，结论倾向于希格斯粒子存在。在 CMS 和 Tevatron 展示它们的数据之后，结论既有可能反转，也有可能更加倾向于希格斯粒子存在。目前我还不清楚。但与之前的一些情况相比，现在情况真的非常有趣了。

ATLAS 希格斯粒子结果将在欧洲中部夏令时间 15 时整由凯尔 · 克兰默（Kyle Cranmer，美国纽约大学）公布（我将在那之后发表这篇文章），就在 CMS 之前。大型强子对撞机的所有希格斯粒子结果随后将由比尔 · 默里（Bill Murray，STFC 卢瑟福–阿普尔顿实验室）在全体报告中总结。这些结

果是数以百计的科学家在 LHC 机器和 ATLAS 上的无数心血的结晶。

我之所以在此处引用这篇文章，是因为我觉得，它真实表现了那时我们处于不确定性中的感觉——焦虑伴随着激动。

正如之前我所提到的（不要管那些神经兮兮的黑洞末日论者们怎么说），粒子物理的结论通常不会将生命置于生死存亡之间。但相同的东西（统计置信度、系统偏差、实验考虑不周全）也见于医药测试或气候研究中，那些地方若出现差错则将有丧身之忧。而在所有的情况中，通常都牵涉到强烈的自尊心和既得利益。真知将从传言、声明、反诉和质疑当中脱颖而出。

至于我在 EPS 会议之前所设想的情况，实际发生了什么？那三种情况中，到底出现了哪种情况？好吧，Tevatron 实验在相关质量区间对标准模型希格斯粒子不敏感。它们的灵敏度停在了 148 GeV 的地方。然而，CMS 确实足够灵敏，发现了一些和 ATLAS 类似的结果（同样在没有看到我们结果的前提下，正如我们也未看过它们的结果）。所以进一步增加了概率。

下一步，我们需要降低不确定性。

首先是统计不确定性。凸起有可能只是偏大的随机涨落。设想通过抛硬币观察硬币是否公平。如果连续四次都是正面朝上，你就会产生怀疑，因为你本来期待两次正面两次背面。但这并非很有意义的结果，因为即使是公平的硬币，连续四次正面朝上的概率也不低：2 的四次方分之一，即十六分之一。而连续四次相同面朝上（或者全都正面朝上，或者全都背面朝上）的概率是其两倍（八分之一）。所以在你较为确信（比如说，精确到千分之一，或者说 99.9%的置信度）硬币有偏差之前，最好继续抛硬币。这个例子阐释了统计不确定性将影响

你所下结论的置信度——此处即“硬币有偏差”。数据越多（持续抛硬币），不确定性越小。所以很明显，我们将继续从 LHC 的质子–质子对撞中收集更多数据加以分析（等价于持续抛硬币），直到我们可以看出是否真有希格斯粒子存在，它使结果发生偏差。

第二种是系统不确定性。这种不确定性取决于我们了解（或者不了解）探测器的程度。例如，当电子撞击时，我们实际能够发现它的概率有多大？对它能量的测量有多精确？

ATLAS 和 CMS 是两个完全独立的探测器。所以一方面它们可以增加统计数（减少第一种不确定性），另一方面，它们都有独立的、非常不同的系统不确定性，后者取决于我们对各自不同探测机技术的了解程度。所以同时在两个实验中发现相同东西确实能够增强信心。而且在获得更多数据后，我们可以设计更多控制实验，以便检测和改进我们对探测器的了解。

不幸的是，并非所有系统不确定性都是独立的。在不独立的系统不确定性中，最重要的是来自理论计算的不确定性。理论告诉我们某个特定质量的希格斯玻色子是怎样的，同时也告诉我们背景（无希格斯玻色子生成的事例）应该是怎样的。CMS 和 ATLAS 两者都依赖于这些结论。当我们说“我们获得了一个超额现象”，其实是说我们获得的事例数多于不存在希格斯玻色子情况下预期的事例数。而我们都用了相同的理论。所以如果理论有错，我们都将看到假信号。

我们使用的理论实际上已经非常可靠。然而，理论毕竟不是现实。为了减少理论的系统不确定性，我们采用了与减少探测器系统不确定性类似的方法，同时也借助了理论物理学家的帮助。我们需要进行更多的控制实验，测量 LHC 能量范围内各种不同类型粒子的生成，再检查理论描述和它们的符合程度。如果不符合，就需要找出原因，加以修正。在此处，我们尤其需要测量 W 玻色子的生成，因为当时我们观

测到的大部分凸起都来自双 W 玻色子生成的事例。

进入下一轮搜寻，以及下一次会议。这一回在 2011 年 8 月。而每个大型会议都在大型希格斯粒子搜寻行动中升级到了最前沿状况。我错过了格勒诺布尔的会议，正在飞往印度孟买的途中。

5.8 印度孟买

飞机上的茶简直无可挑剔。

我从来不曾想过我会写出上面那句话。但我觉得，如果你有机会在万米高空喝到无可挑剔的茶，那一定会是在前往印度的英国航空公司航班上。印度在板球比赛中输给了英格兰队，但出租车司机在前往城郊的途中还是滔滔不绝地谈论着这个话题。这是一辆独特的出租车——小型电动三轮车，它在郊区非常流行，但被禁止在孟买市中心运营，而且我怀疑，它也被禁止在机场运营。

作为粒子物理学家，我经常旅行。但实际上，我走得并不远。大部分旅行是往返于英国和日内瓦之间，但即使在大型强子对撞机给我带来这种半规律的往返旅行之前，我大部分时间也都待在欧洲以内，偶尔前往北美和日本。基本上都是世界上更发达、更工业化的地方。或许这也不是什么意外之事。即使是我，也不会在经济发展早期阶段将重大粒子物理设施的建造作为优先考虑的事情。

话虽如此，还是要尽早开展粒子物理研究。这些活动能带来大量经济效益，而且在那些致力于回答有关我们所居住的物理世界本质问题的基础研究中，它是不可或缺的一部分。更何况，这个课题必然依赖于协作。CERN 的总干事罗尔夫·霍伊尔（Rolf Heuer）在欧洲物理学会高能会议的闭幕式上便说道，CERN 中的“E”现在不仅代表“欧洲”（European），也代表了“每个人”（Everyone）。如果想在能量最

前沿从事物理研究，那么无论你来自何方，目前能去的地方就是CERN。而为了将来继续保持最前沿的科学研究，我们需要全球合作。

印度很久以前就属于其中一部分。著名的印度物理学家萨蒂延德拉·纳特·玻色（Satyendra Nath Bose）将他的名字留在了拥有整数角动量的一类粒子上——玻色子，其中希格斯玻色子目前仍是猜测，而W和Z玻色子（以及光子）都是确凿的事实。孟买的塔塔基础研究院（Tata Institute）在基础科学的研究上也有很长历史。在2011年，它承办了轻子–光子会议（Lepton Photon Conference）。麻烦的签证、防疫注射、茶和出租车，以及一段坐在类似蚕茧的三蹦子里急速飞驰的经历，是我关于印度的一些印象。

轻子–光子会议上没有平行报告议程。所有报告都是“邀请人”报告——真是了解这个研究领域概况的好地方。1999年在美国斯坦福举办的轻子–光子会议上，我给过一个报告，关于光子的结构。[①]然而，那次会议给我留下最深刻印象的是索尔·珀尔马特（Saul Perlmutter）关于超新星亮度结果的报告。这是宇宙学标准模型中暗能量存在的最新证据之一。那些工作为珀尔马特、布赖恩·施密特（Brian Schmidt）和亚当·里斯（Adam Riess）赢得了2011年的诺贝尔物理学奖。

老实说，令我念念不忘的还有纳帕谷之旅以及斯坦福大学校园内午餐和晚餐供应的精选葡萄酒。我觉得，乔安妮·休伊特[②]和其他会议组织者功不可没。

2005年在瑞典乌普萨拉，我参加了另一次轻子–光子会议。我也给了一个报告，关于QCD的实验研究。加万·萨拉姆（在纪录片《对撞的粒子》中出现过）关于相同的主题给了一个理论报告。我记得好几次我被问到，我和CERN曾经的研究主管伊恩·巴特沃思（Ian

① 光子实际上没有结构，但里面还是有非常有趣的细节。

② 参见3.5节“超对称”。

Butterworth）有什么关系，所以很好奇为什么没有人问加万，他和阿卜杜勒·萨拉姆（Abdus Salam，理论物理学家，诺贝尔奖获得者）有什么关系。据我所知，我们和他们没有任何血缘关系。[①]令我印象深刻的还有酒吧厕所前长长的队伍，因为似乎（一些）瑞典人不赞成男女分开的厕所，因此导致男人以令人敬畏的男女平等方式和女人一起忍受等厕所的煎熬。其实他们应该事先贴张公告："尊敬的先生，请您与大多数女士通常必须做的那样，提前半小时规划您的如厕行为，以免不必要的麻烦。"而且这里的鱼无可挑剔，尤其是早餐的鱼。在我心里，鲱鱼早餐一举击败了英式培根煎蛋早餐。

鉴于我对文化差异（葡萄酒、厕所和鲱鱼）的分析的深度，我谈论起印度的茶和板球想必也不意外。

在孟买轻子–光子会议上，有关希格斯粒子的最新消息报告让人有些小失望，这也是可以理解的。EPS 会议前一个月，ATLAS 和 CMS 都在数据中发现了一些线索，虽然在统计上仍不显著。当时人们认为，在这次会议上结果的显著性将会增加。然而，即使我们已经加入了更多数据，显著性也没有增加——事实上，反而下降了一点。总之，仍然不显著。它们都可以解释为统计噪音偏大或偏小所导致的结果。

在 EPS 会议上，人们讨论发现，希格斯粒子更有可能出现在 130—150 GeV 的质量区间内。在轻子–光子会议上，这种可能性又降低了一点。95%置信度的排除范围降低到了 145 GeV。在更高质量区间，大量样本和可能性都被排除了。但对 115—125 GeV 的质量区间我们仍所知甚少。

然而，很快就会知道了。

① 虽然我发现，伊恩·巴特沃思是我博士生导师的导师的导师，所以应该算是我的祖祖师爷。

5.9 谁主沉浮，理论还是实验？

当公开讨论科学时，一个反复出现的话题是，基础物理研究过于倾向理论了。我们沉迷于证明完美的还原论，虽然如果仅限于探索，生活会轻松许多。我们也花费了太多时间争论不可验证的东西。这些不是可以轻易被无视的批评，而且有时候，对一些物理学家而言，这几乎肯定是公正的批评。然而，虽然“搜寻希格斯粒子”很显然是建造 LHC 的主要理由，但我还是要提出三个论据，反驳“已经有太多理论”的观点。

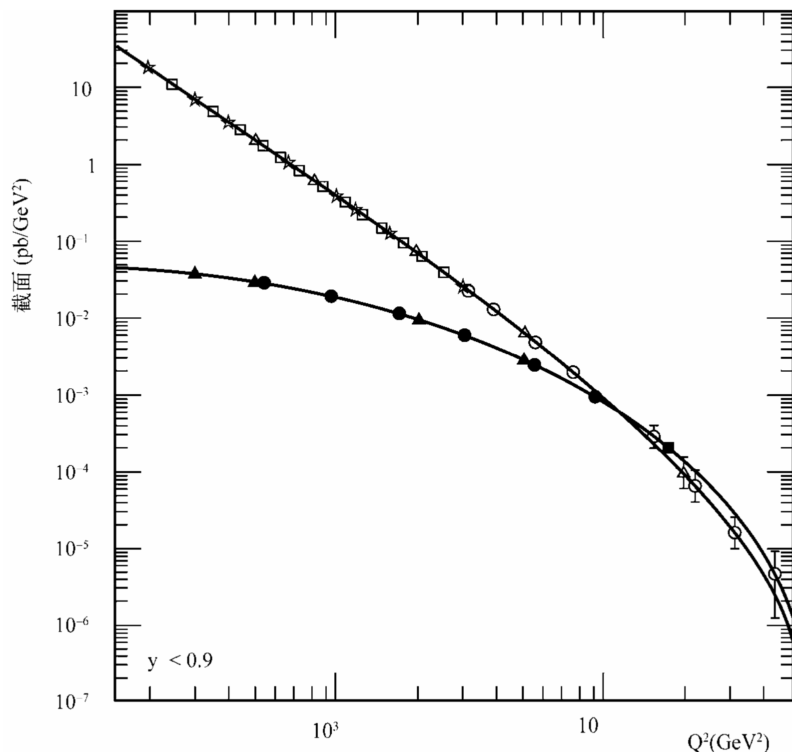
1. 思想实验

虽然有些东西目前不可验证，但对它的理论讨论可以洗刷我们认知中的矛盾和不一致。例如，黑洞在某种程度上等价于一个“极端思想实验”，它将三个极其成功的理论（或者说“物理定律”）之间的矛盾暴露了出来。量子力学、引力和热力学都有它们各自的定律以及关于宇宙的基本图景。它们之所以可信，是因为每种理论都分别能准确描述大量物理现象，从蒸汽机、行星到你电脑中的中央处理器。然而在黑洞中，这三种理论之间似乎存在矛盾。三个伟大定律的地盘发生了重合。通过思考其中的矛盾，我们可以找出理论的不足，对它们进行新的理解，以期最终推导出可观测的预言，使我们能够验证新的理解。这是非常值得我们去做的练习，除非你只对理解现实世界怎么运行感兴趣，或者只是想从理解中获益。

2. 电弱对称性破缺

对一些人而言，大型强子对撞机似乎是对时间、金钱和专业技能（以追求某些物理学家的梦想）不成比例的投资。我当然不同意这种意见。虽然希格斯粒子一直占据着头条，但 LHC 其实在探索任何可能的

新领域。不管彼得·希格斯有没有这样说过，能量最前沿（如果你愿意，也可以说超短距离最前沿——我们在从未见过的极小尺度上研究大自然）确实同样也是知识的一个最前沿。而且仅仅从实验出发，我们就有很好的理由相信这个最前沿很特殊。请看如下图表：



数据来自德国汉堡 DESY 研究所的 ZEUS 和 H1 实验

上图展示的是电子从质子反弹回来的概率，反弹能量（x 坐标）从左往右递增。空心点表示因电荷（电磁力）而发生的反弹，实心点表示因交换一个 W 玻色子（弱力）而发生的反弹。你可以看到，在低能区域（靠近左边）电磁力远大于弱力，而在高能区域（靠近右边），

弱力和电磁力旗鼓相当。所以某种对称性在高能区域得以复原。这些数据来自 HERA 实验。都是测量，没有理论。（虽然实际上这些拟合曲线属于理论，不过你可以暂时无视它们。）

LHC 使我们能够超越此能量，进入对称性复原的区域，这在科学史上还是第一次。理论预言，希格斯粒子破坏了对称性。但即使没有理论，你可能也会意识到，在这个重要的能标之上探索物理是非常令人激动的事情。而且它有可能告诉我们这些力如何运作，为什么有时候它们一样、有时候又如此不同。

3. 寻求满足

最后一点。虽然才运行了一年，LHC 目前的数据已经点燃了烧死理论的篝火。即使诸如超对称和额外维的想法还没有被完全证伪，它们的许多可能性也已经被排除。

在轻子–光子会议的最后一天，孟买大雨瓢泼。午餐时分雨声如此之大，掩盖了 SUSY 理论物理学家落入咖喱饭的泪流声，他们正为了早上获悉的 LHCb 的结果而伤心。LHCb 是 LHC 上四个大型实验之一，但目前为止它在此书中几乎还没有什么戏份。大部分是因为它所测量的是非常罕见的粒子衰变（特别是含有 b 夸克的强子，所以它的名字中有个 b），而这和搜寻希格斯粒子没有什么关系。不过，它对超出标准模型的物理非常灵敏。SUSY 理论物理学家其实没有如此伤心欲绝，不过赫拉德・拉文（Gerhard Raven）关于 LHCb 结果的报告还是给了他们最爱的理论重重一击。他公布了一个非常精彩的测量结果，关于 B_S 介子（由一个底夸克和一个奇异夸克构成的强子）的某个特定衰变。结果和标准模型非常吻合，而标准模型不包含 SUSY，尽管有些理论物理学家对 SUSY 信心十足。之前有一些不太精确的测量结果稍微偏离了标准模型，而这种差别可能由 SUSY 引起。但这一次否定了之前

的结论。更多希望破灭，虽然 SUSY 本来就比希格斯粒子还不可靠。而关于它已经灭亡的传言甚嚣尘上。

同样在那次会议上，我的一个朋友，珍妮 ·托马斯（Jenny Thomas），对当前和未来的远距离中微子实验（例如 T2K）做了报告。她需要报告的一件事情是，另一个“新物理的线索”（这一次来自她的实验，MINOS）也消失了。这是关于中微子和反中微子之间某个显然意料之外的差异，在去年巴黎的 ICHEP 会议上首次被公布。虽然很吸引人，但那时的测量不是很精确。和 LHCb 相似，更精确的测量结果站在了标准模型一边。估计又让很多人失望了。

珍妮道出了一个事实：我们常常一发现这类反常事件就兴师动众。大家都在讨论 90%置信度的排除范围，或有 10%的概率一些数据和标准模型一致。但 10%不是小数。如果你科研经验丰富，你就会知道有很多 10%概率的事件会发生。正如在孟买所见，新结果无时无刻不在汹涌来袭，既有来自 LHC 的，也有来自其他地方的。对此喜形于色，甚至因此心潮澎湃，都是可以理解的。然而，我们仍然必须保持理性态度。对于希格斯粒子的搜寻，我们至少是在讨论 95%置信度的排除范围。但依照惯例，可作为真正证据的标准是“三个 σ”，对应于 99.7%的概率。[①]而可作为“发现”的标准是五个 σ，即 99.999 94%的概率。这些惯例的存在不无理由。即使在如此高的确定性下，古怪之事仍然发生，而错误也仍然会出现。

确实，很多人有他们自己喜欢的理论，但最终还是实验数据主宰命运。而作为一个实验物理学家，我非常享受于让无数耀眼的想法接受各自的审判。我们已经等待了很长时间，不断进行理论研究以及猜测。现在终于等到了这一天，我们得以一窥某些更近于答案的东西。

---

① 参见“术语：标准差、概率和置信度”（第 141 页）。

第六章

希格斯粒子的首个线索和一些疯狂的中微子（2011 年 9 月—2011 年 12 月）

6.1 超光速中微子：一个案例分析

我们现在正在为 12 月举办的 CERN 理事会会议做准备。我们需要对 LHC 的各种结果做一个年终总结报告，（当然）尤其着重于希格斯玻色子的搜寻。

CERN 理事会是 CERN 的管理机构。第二次世界大战之后，许多当时最优秀的物理学家被迫逃离欧洲。他们通常先到英国寻求庇护，不过往往马上就被建议前往美国。因此，众多天才齐集美国[①]，而其中许多人帮助美国制造了投放到日本广岛和长崎的原子弹。为了复兴欧洲的物理，在 1954 年，欧洲的 12 个国家[②]组建了 CERN。

① 令人欣慰的是，现在的英国当然不会像过去一样愚蠢，冷漠地对待政治避难者和潜在的天才移民。你说呢？

② 分别是比利时、丹麦、法国、联邦德国、希腊、意大利、荷兰、挪威、瑞典、瑞士、英国和南斯拉夫。

CERN 组建之初即是非军事机构，创始成员国包括好几个在冷战中保持中立的国家（例如瑞士），而且甚至在紧张的国际局势下，它与苏联及其他华约成员国的合作仍在继续。我在 1991 年参加的一次暑期学校就是由 CERN 和苏联的杜布纳联合原子核研究所（Joint Institute for Nuclear Research，JINR，位于现俄罗斯莫斯科州杜布纳市）合办的。我去了杜布纳研究所，它是邻近莫斯科的一个大型实验室。我们在黑海边克里米亚半岛的阿卢什塔待了两个星期。几个星期之后，发生了一场导致后来苏联解体的政变，而当事人戈尔巴乔夫当时就在离我们非常近的一个酒店度假。

理事会由每个 CERN 成员国的两名代表以及总干事及其主管团队组成。通常，观察国和申请国也会派遣代表参加。英国代表通常是有关政府部门（当前是商业、创新及技能部）的一名高级官员和有关研究委员会（当前是 STFC）的行政总裁。假如其中一位因故无法参加，我就会代替出席。除了监督日内瓦实验室的运行状况，CERN 理事会还负责“该领域的国际合作项目的组织和赞助事宜”。

正当我们紧锣密鼓地为 12 月的年终报告做准备、届时或许将公布有关希格斯粒子的决定性结果之时，另一个和 CERN 相关的实验小组敲开了总干事罗尔夫·霍伊尔的办公室大门，请他批准一个研讨会，以公布他们测量到超光速粒子的消息。我可以想像当时 CERN 总干事的表情会是怎么样的。

那个粒子是中微子，而那个实验小组名为 OPERA①。在研讨会的同一时间，他们往 arXiv②和杂志上投递了相关论文，所以我们可以仔细审读这个惊人结论的证据。

① 感光乳剂追踪装置振荡项目（Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus，OPERA）。巧妙的缩写。是否也是巧妙的实验？

② 参见：http://arxiv.org/abs/1109.4897.

OPERA 测量了来自超级质子同步加速器（Super Proton Synchrotron，SPS）的中微子。SPS 是 CERN 加速器设施群中的一个加速器。它的前身是超级质子–反质子同步加速器。在 1983 年，UA1 和 UA2 实验通过它产生的对撞事例发现了 W 和 Z 玻色子。卡洛 · 鲁比亚和西蒙 · 范德梅尔因此获得了次年的诺贝尔物理学奖。回顾历史，虽然 CERN 之前也做出过非常重要的突破性工作，但 W 和 Z 玻色子的发现才让它真正成为了世界一流的实验室。现在，SPS 也是 LHC 的质子注入器。所以不减当年风采。

中微子不间断地从 SPS 射出，从阿尔卑斯山下穿过，直到 732 千米外意大利的大萨索山国家实验室（Gran Sasso National Laboratory）。部分中微子可以被 OPERA 实验探测到。OPERA 实验的设计目的是测量中微子在运动过程中性质的变化。事实上，他们想要测量 τ 子中微子。OPERA 还拥有非常精确的全球定位系统（GPS）和时间测量设备，所以他们知道中微子的运动距离和运动时间，因而可以测量速度。由于中微子的质量非常微小，它的速度将非常接近光速。但他们发现中微子比预计时间提前到达——超光速运动。

如果结论确实成立，这将是惊天动地的突破性进展。光速 c，作为自然界能够达到的最高速度，深深根植于我们用以理解宇宙的数学中。[①]它是相对论的基础之一，而相对论精确描述了各种物理现象，包括用来测量位置的 GPS 系统和用来产生粒子束的加速器。所以不能随便断言超光速。即使存在更完善的理论，它也应该包含乃至扩充爱因斯坦确立的理论架构。

虽然很难想像这种理论是什么，但很快“额外维”理论的拥趸们就提出了一些观点，声言中微子通过另外的维度走了捷径。这类似于

① 参见 2.2 节“最小偏差”。

一个生活在地球表面的“二维”伦敦人通过穿越地核（另一维度）走捷径到达悉尼。

这些解释都很精彩，不过有些太早了。现在还只有一个结果，而且甚至 OPERA 的物理学家也不敢相信这个结果。他们的论文看起来确实很严谨，而且合作组已经对它进行了一定程度的评审，虽然其中一些成员也曾在公开场合表明论文的评审尚未达到他们期待的全面程度。9 月 23 日，OPERA 物理协调员达里奥·奥蒂耶罗（Dario Autiero）在 CERN 主持了一个科学研讨会，他听取解答了许多问题。这是正常的科研活动，我并不责怪他们向媒体公布结果，也不责怪他们轻易就因数据的可能推论而大惊小怪。若非如此，他们还能怎么做呢？将结果秘藏？如果他们确实如此做，阴谋论者就会说：“CERN 将表明爱因斯坦错误的证据藏起来了！”我已经收到大量类似的妄想症信件和电邮，抗议这种事情。而阻止 OPERA 公开他们想要公开的数据只会让那些人更疑神疑鬼。

我不会也不想责怪媒体因这个结果而大惊小怪。他们还能怎么做呢？忽视这个消息？公众对物理感兴趣是件令人高兴的事情，而这本身也是一个精彩的物理故事。或许这个事件有些过度曝光，而且有些过度炒作，但本质上它仍然是一个正在进行中的关于某个迷人结论的科学争论。它并非捏造。只要公众不因此反感，或许公开展示科学争论的过程将会成为全新的、具有教育意义的热门运动，甚至可以发展为全民参与的运动。这难道不是一个好现象吗？

当然，重要的问题是：“它真的正确吗？”有什么地方可能出错呢？它看起来是个严谨的研究，是由一个大型实验组积年累月做出的结果，所以在没有仔细分析的情况下断言“这必定有错”并不是公平公正的态度。虽然我不得不承认，这是我听到这个结果后的第一想法。物理学家吉姆·艾尔–哈利利（Jim Al-Khalili）没有这么多顾虑，他公开打

赌，如果这个结论正确，他就吃下他的拳击短裤。本着公开做科学的精神，我决定出面说明我对这个结果的主要顾虑。

这个顾虑和质子在 CERN 质子源处的时间分布有关。质子撞击到靶子上，生成一堆中微子。OPERA 也对抵达大萨索山实验室的中微子的时间分布进行测量。他们将两处的时间分布图进行拟合，当两者能够重合时，就可以得出运动时间，因此也得出速度。这种测量大部分依赖于脉冲信号最前和最后的边缘，即脉冲中最先和最末中微子的抵达时间。

他们声称，分布图拟合的精确度约为 10 纳秒（6.9 纳秒的统计不确定性和 7.4 纳秒的系统不确定性）。这在我看来已经有些粗糙。但我的主要顾虑其实是，他们似乎假定两个时间分布的形状必须完全吻合。在他们对系统不确定性的估计中，并没有允许形状并不完全吻合的可能性存在。但不难想像，出于某些原因，在大萨索山测量到的中微子脉冲分布图形状（作为时间的函数）可能并不与中微子在 CERN“开启”和“关闭”的形状一模一样。在我看来，这似乎是个奇怪甚至严重的疏忽。例如，当中微子刚开始在 CERN 生成并被测量时，所有的质子都被记录在时间形状中。当它们抵达大萨索山时，由于扩散，粒子束覆盖的空间将大于 OPERA 探测器，所以 OPERA 只能发现粒子束某些部分的中微子。所以中微子生成时间和扩散角度（将决定哪些中微子是否真正进入 OPERA 探测器）间的任何关联都将改变时间分布图形状，导致拟合中的不确定性，从而导致速度的不确定性。

我在一张餐巾纸上结束了以上讨论。这些讨论将用于马库斯・杜索托伊（Marcus du Sautoy）执导的一个 BBC 纪录片。他们在获悉超光速中微子结果后第一时间制作了纪录片。我觉得，这是很有趣的讨论，虽然我没有声称它就是结果背后的真相。

我很庆幸自己没有如此声称。几个星期之后，OPERA 合作组投递

了论文的更新版本。和第一个版本相比最重要的改变就是，他们进行了新的试验。不同于原来发射较长的中微子束，现在 CERN 发射了短脉冲，仅有三十亿分之一秒长。所以现在 OPERA 物理学家并不需要知道脉冲的形状就可以测量时间，他们只需要知道中微子来自哪个脉冲。他们重新进行了研究，在探测了 20 个中微子之后，得到了相同的结论：中微子仍然以超光速运动。

一次试验成功了，但还需要进行更多试验。实话实说，由于这是如此不同凡响的结论，如果正确，将会带来翻天覆地的改变，所以我们至少需要另一组完全独立的实验对它进行验证。其他远距离中微子实验（美国的 MINOS 和日本的 T2K）开始跃跃欲试。

当然，毫无意外，这个结果是错的。而令人意外和尴尬的是它的错误方式。没有人能够在他们的论文中发现错误原因：某个负责电信号和光信号转换的线路插头没有连接好。这个问题修复后，结果就和光速一致了。一个精彩的故事就这样仓促结尾。OPERA 物理学家本来应该有能力发现这种类型的错误，而这个错误本来应该在结果公布之前就被发现。最终，作出之前那些决定的实验室主任引咎辞职了。

我之所以觉得值得在这里复述这个有些冗长杂乱的故事，有三个原因。

第一个原因是，它提醒我们思考，如果情况相反，将会怎么样？如果测量结果和预期吻合，表明中微子以光速或低于光速运动，我们还会如此仔细地考虑不确定性吗？还会检查那个插头吗？我还会花很多时间研读那篇论文吗？而且假若结果虽然符合预期，却是错误的，我们有可能发现错误吗？这可以算是科学中确认偏差（confirmation bias）的一个例子——如果某个结果和预期一致，你就会相信它的正确性，而停止寻找它的可能错误之处。我测量过许多和标准模型“吻合”的东西。我也得到过和标准模型不吻合的测量结果，但这类结果

总是令我怀疑，所以我会尝试寻找它的错误。我总能找出错误——或者在我自己的测量里，或者在用以比较的理论中。我们很仔细地复查所有测量过程，但我不敢说在吻合和不吻合两种情况下我们都同样仔细地进行了复查。如果有足够多人客观地重复了实验，错误最终还是会被修正，但这需要时间，而且这是微妙的偏差效应。

第二个原因是，我想借此再次说明，科学进展往往并不像事后看来那样顺利清楚。我在此书中记录下的是有关某段科学发展历史的报告。即使不剧透，我也必须承认，整个故事有可能会看起来像是一个势不可挡地走向一个胜利结局的进步过程。然而在当时，故事看起来并非如此。科学中有许多死胡同和错误。当与之相关的数据最终被我们弄清楚时，它们就会因为不相关而被我们忘记。但如果我们只是记住自己所做的正确的实验，那我们就是在自欺欺人，而没有给整个过程或历史它应有的功劳。

还有第三个原因。

还有为数不少的人沉迷于"颠覆物理学"（通常是职业物理学家和记者），或者至少证明爱因斯坦是错的（一些业余爱好者，他们自以为掌握了真理却被人无视和迫害），或者愤怒于科学对一些客观真理和特殊状况作出的断言（大部分是资质平庸的哲学家和社会学家，有时候还包括一些其政治或宗教信仰与实验数据所代表的现实相冲突的人）。新数据有可能颠覆现有科学确实是很不错的想法。而且即使存在之前提到过的确认偏差，这个想法仍然有可能成真。事实上，科学家有很强烈的动机去制造颠覆性的、革旧维新的实验数据。你将因此而出名——短暂的名声，如果你像 OPERA 一样犯了错误；名载史册，如果你做对了。但这并不意味着我们一旦发现新东西，就要把原有知识全都扔掉。

在媒体上可以找到许多关于我们希望通过 LHC 发现什么的概述

文章，它们大部分提供了有可能证实或证伪的理论列表。列表中的理论（超对称、额外维等）通常用于解决标准模型不能解释或没有提及的问题。它们通常假定一些或许会在 LHC 中发现的新现象——大致就是粒子或作用力。新理论的列表为我这样的实验物理学家提供了捷径。如果理论告诉了你需要寻找什么，你就可以更高效专注地寻找。但如果什么也没有找到，则寻找结果是否有用就取决于你对理论的重视程度。这在某种程度上属于主观标准。例如，寻找能够排除某些形式超对称的结果是人们很感兴趣的事情，因为很多人非常严肃地将超对称当作标准模型扩充理论的一个候选者。从某种衡量标准你也能看出结果的重要性：如果你写了此类文章，你将会得到大量引用。

然而，作为实验物理学家，我对这种工作方式并不满意，而且它也不是全部故事。我并不把自己的职业生涯看成寻求某个新理论的证据或证实标准模型的过程。对我而言，最重要的是测量 LHC 为我们开启的新能量领域中真实发生的事情，利用测量结果质疑和改进对大自然的现有理解。当然，这其中也包括和理论预测作对比，但这里所采用的工作方式已然不同。这里的测量通常独立于理论，它们决定了某个特定理论是否就是正确理论。

为超出标准模型物理的某些特定理论寻找证据的各种失败尝试，构成了相当多 LHC 论文（或许太多了）的主题。然而，还有很多 LHC 论文描述了一些更独立于理论的测量结果。这两种工作方式相辅相成，但其中还有一些灰色地带，在那里寻找的是更普遍、和理论更少关联的新现象。

如果出现了某个新理论的证据，或者找到了一些不符合标准模型预测的东西，我们就可以说标准模型出错了。有些人可能会惊讶地发现，其实很多粒子物理学家非常期待这种结果的出现。

科学家兼作家艾萨克·阿西莫夫写过一篇很精彩的文章（更确切

地说是一封信），阐述了科学如何改进我们用以理解大自然的理论框架。旧理论被丢弃，取而代之的是新理论，过程虽然曲折，但总体是在前进。理论不仅仅是思想界的时尚。在科学中，每个成功的新理论都对应于自然现象的更完整集合，因而提供了更深刻的理解，对人类更有用，在这种意义上也就更加正确。阿西莫夫利用有关地球形状的各种理论为例进行了非常精彩的讨论：平的？球形的？椭球的？梨形的？在某一处，他写道：

> 以前人们认为地球是平的，其实他们错了。之后人们认为地球是球形的，他们又错了。但如果你觉得认为地球是球形的与认为地球是平的所犯的错误程度一样，那就大错特错了。

在几千米的距离尺度上，如果你将山峰和山谷加以平均，地球可以看成非常平坦。这是自古就有的观察结果，但有点小错误——其实地球存在一个很小却至关重要的曲率。类似地，如果希格斯玻色子不出现，将意味着标准模型有错误。而即使希格斯玻色子出现了，理论最终也有可能（或许将会）在其他地方出现“错误”。但至少在目前研究的距离尺度和能量范围内，即使有错，那也只会是小错误，因为该理论很好地描述了已知数据。

就如同地球微小的曲率，任何对标准模型的微小偏离也可能会对我们理解世界产生深刻影响。它们可能会促成一个更大、更好的理论出现，以取代标准模型。

但这并不意味着验证标准模型是浪费时间。标准模型比我们之前所知的更正确，而新的理论只会更加正确。正如阿西莫夫所言，或许更合理的做法是将之前认为正确但现在已被丢弃的理论描述成“不完善”而非“错误”理论。新理论需要像标准模型一样成功描述所有目前已知的观测现象，同时还要能够描述新的观测现象。它将更加完善，

并在前述意义上，更加正确。这是乐趣所在。

同样地，任何“证明爱因斯坦错了”的人，实际上需要将爱因斯坦理论符合实验数据的部分包含进他们的理论，并指出不完善的地方，使它更完善。这和时尚不一样。我年纪大了，看得多了，曾经目睹曼彻斯特一阵风般流行紫色，很快又过时了，很快紫色又无处不在，很快又无处可寻。这不是科学。和时尚或哲学不一样，科学总是在前进。令我惊讶的是，许多以科学为研究对象的学者竟然无法理解或认可这个事实，这个人类活动最迷人、最独特的特征。

作为吉姆·艾尔–哈利利（现在他没有吃下拳击短裤的危险了）主持的小组讨论的一部分，我准备在切尔滕纳姆科学节上讨论中微子争论。在科学节开始之时，有关争论已经尘埃落定，OPERA 的结果毫无意外是错误的。然而，讨论现场仍然座无虚席，甚至连地板都坐满了人。我想，大概即使是错的，物理也可以很有趣。

6.2　微扰理论：我们是否掩盖了新物理？

我们想要通过 LHC 解答的大问题可以总结为：粒子物理的标准模型在 LHC 能量区域是否成立？“LHC 能量”是向前跨出的一大步，因为它在电弱对称性破缺能标之上，两种作用力在此统一，而 W 和 Z 玻色子（甚至很可能包括其他所有基本粒子）的质量源于此处。

如果标准模型在新区域仍然成立，则除了希格斯玻色子外，不会出现其他新东西；如果不成立，则希格斯玻色子可能不存在，但必定会出现一些不可思议的新东西。这句话背后还隐藏着一个关键问题：在 LHC 能量区域，我们究竟能对标准模型给出多精确的预测？这并非一个简单问题。一般而言，我们无法精确求解标准模型，所以我们使用近似方法。而这些方法依赖于一个事实，即“耦合常数”（基本作用

力的强度[1]）很小。

作用力的强度可以用数字表示。例如，强度是 0.1，则两个粒子相互作用的概率正比于 0.1×0.1=0.01。但如果还有第三个粒子，概率将是 0.1×0.1×0.1=0.001。若有第四个粒子，则概率为 0.0001，依此类推。这意味着如果耦合常数很小，你就可以忽略多个粒子过程（例如多于四个）的贡献——它们只会给主要结果引进非常小的修正，因为它们的贡献需要至少乘以 0.1×0.1×0.1×0.1×0.1=0.000 01。所以它们基本不会影响结果。这是“微扰理论”的一个例子，而物理和化学中很多问题的求解都需要借助于微扰理论。计算结果之所以精确，是因为耦合常数很小，即作用力很弱。

然而，这种近似方法并非总是适用。而它不适用的地方大部分都和强力有关。这就是强力如此命名的原因。（当然，它确实像它的名字一样太强而难以攻克，虽然我们并非有意将这两种意思混淆。）

例如，我们无法从第一性原理出发推导夸克和胶子在质子中的分布方式[2]，同样也无法推导夸克和胶子最终转变成新强子的方式。我们可以从理论中得到一些约束条件，我们也有一些诸如能量和动量守恒的基本原理，我们还拥有大量来自别处的实验数据。但我们无法使用微扰理论。它的耦合常数接近 1，所以 1×1×1×1=1。这意味着，无论在计算中包含多少粒子，结果都不会收敛到一个可信的答案。最终我们需要构建基于经验的猜想或者理论模型，而模型总是可以调节的。

那么问题来了：激动人心的新物理有可能会在模型调节的过程中被掩盖。为了避免此类情况的发生，你需要用微扰理论计算一些已知的理论，再将它关联到尚不清楚的模型上，后者拥有一些可调节的自

① 即在费曼图中和每个顶点对应的数值。参见“术语：费曼图”（第 146 页）。
② 参见 4.5 节“质子内部”。

由度。这就好比给坚硬的“预测”骨架包上柔软的“最佳猜想”血肉。血肉能够改变形状。你可以压压它的胃部或捏捏它的脸颊，这不会引起多大痛苦。但你需要断开手臂，才会发现前臂由尺骨和桡骨两根不同的骨头组成。

将坚硬的微扰理论和柔软的模型相结合的工作大部分由名为蒙特卡罗事例生成器的计算机程序完成。它们不仅包含了粒子对撞中我们已知的事情，而且作为一种非常宝贵的工具，能够用来设计新的实验以及探究现有实验如何对数据产生影响。“蒙特卡罗”是世界著名的赌城，所以这个名字暗示着，和轮盘赌的原理一样，这些事例生成器使用了大量随机数据。

这里面有一个很有趣的社会学现象。作为一个理论物理学家，有时候投身于事例生成器的工作并不会给你带来成功。你写了一篇论文，得到了上千引用率，但人们会说：“不过就是个软件”或者“不过就是蒙特卡罗玩意”。而若在弦论领域你也得到了上千引用率，你就可以作为巨匠在世界昂首阔步。而实际上事例生成器能够描述数据，而弦论还在勉强预测着一些远远无法测量的东西。

蒙特卡罗并非唯一的研究方式，但大体上可以说，它是人们为了理解标准模型的内涵、尽量做出精确预测所付出努力的一部分。鉴于蒙特卡罗圈子的相对规模，这种努力几乎可以和建造 LHC 本身相等。作为对它的认可，2011 年美国物理学会（American Physical Society，APS）的樱井奖颁发给了在此领域工作的三位理论物理学家：布赖恩·韦伯（Bryan Webber）、圭多·阿尔塔雷利（Guido Altarelli）和托尔比约恩·舍斯特兰德（Torbjörn Sjöstrand）。授奖理由为：

> 为了表彰他们的一些关键想法，使粒子物理标准模型得以详细验证，使高能物理实验能够获取有关量子色动力学、

电弱相互作用和潜在新物理的精确信息。

这令我非常高兴，因为一方面，其中两人是我关系密切的同事，另一方面，他们三人所做的计算和编写的代码对理解 LHC 上几乎所有正在进行的研究都至关重要，包括确保我们没有由于疏忽而掩盖任何可能的新物理。在我们继续量化和减少希格斯粒子搜寻的不确定性、寻找关键的三个 σ 证据或五个 σ 发现之时，蒙特卡罗生成器和实验数据的对比工作也在马不停蹄地进行着。

6.3　数西格马

2011 年 12 月 13 日，我们在 CERN 理事会会议上展示了年终报告，报告现场还聚集了大量来自全世界的媒体。当我准备去现场的时候，主报告厅已经座无虚席。有些人直接带着早餐来等待下午的报告。因此我去了分会场，一个名为“过滤厂”的会议室，它同样对媒体开放。所有 CERN 的建筑都由数字标记，但有些幸运的建筑也拥有名字。过滤厂（现在）实际上是一个很不错的会议室，而泵房是一个空旷寒冷的车库，摆放着几张折叠椅，角落里放着一台投影仪。当你在 CERN 主持工作会议时，必须了解这些事情，因为会议室预定系统的默认选项是泵房。

过滤厂同样座无虚席，其中记者和像我一样因为起床太晚而挤不进主报告厅的物理学家大约各占一半。由我们 ATLAS 的老大法比奥拉・贾诺蒂和 CMS 的主任乔・因坎代拉（Joe Incandela）主持的报告将通过网络向全球直播，而我所在的分会场也有直播信号。气氛非常紧张，这不仅是因为记者们需要第一时间听取评论、实时回报最新资讯，也因为科学家们都在满心期待结果的公布。

我当然知道法比奥拉将要公布的结果。我们获得了某个信号的线索，大部分和双光子质量谱[①]有关，但结果小于三个 σ（按照惯例可以称为“证据”的标准），距离可以称为“发现”的五个 σ 还很远。当然，这个结果仍然非常令人激动，而我已经开始相信或许确实存在希格斯玻色子。但我最想知道的还是 CMS 的结果。谣言早就传得纷纷扬扬，而我们也认为他们获得了一些有建设性但非决定性的线索。然而，如果具体到细节，他们的线索有可能和我们相矛盾（如果确实如此，则不免让人失望，甚至令人烦恼），但也有可能和我们非常吻合，以至于综合考虑两者的结果，可以接近甚至超过三个 σ。所以今天或许能够看到“希格斯玻色子证据”的首个官方声明。

谁也没有料到，当时还出现了字体大争论。当法比奥拉开始报告时，现场传出了倒抽气的声音——她使用了不受欢迎的 Comic Sans 字体。不过，和幻灯片的内容相比，字体就显得容易接受多了。那时候，推特上也迎来了一定程度的消息大爆发。更重要的是，CMS 的线索既没有完全支持 ATLAS 的结果，也没有和它相矛盾。对于物理学家以及想要弄清楚背后有什么故事的记者而言，结果多少有些令人沮丧。

但不管怎样，结果背后还是有些故事可讲。在会议室的人都走光后，我在过滤厂接受了《第四台新闻》栏目记者乔恩·斯诺（Jon Snow）的连线采访，麦克·佩特森拍摄了这段采访，作为《对撞的粒子》纪录片的一部分。乔恩·斯诺看起来对我们的进展缺乏线性关联很感兴趣。我不敢确信 ATLAS 和 CMS 是否确实处于非线性的状态，只是感受到了沿着同一条线前进的不一致步伐。当然，没人敢保证它就是正确的线。我希望之前讲过的那些谣言故事（CDF 发现的凸起和中微子的错误结果）能够让你明白为什么我们仍然保持谨慎，甚至欲言又止。

---

① 参见 5.1 节“为什么‘凸起’意味着玻色子？”。

《第四台新闻》并不是那一天的结束。我和几个朋友回到了梅兰的UCL公寓继续庆祝，同时和布赖恩·考克斯进行电话会议。布赖恩正在伦敦哈默史密斯阿波罗剧院的舞台上和罗宾·英斯一起上演《被解放的猴子》(*Uncaged Monkeys*)科学喜剧秀。通话质量不是很好，我觉得大部分观众只感受到了兴奋的物理学家和开怀畅饮的印象，但他们的回应仍然非常热情，除了有些断断续续（既有技术上的原因，也有酒精的作用）。之后的活动更加有趣。STFC的行政总裁约翰·沃默斯利（John Womersley）加入了我们的庆祝，我们相处得挺融洽。鉴于之前发生的种种技术性困难，也经历了布赖恩、约翰和我都身处其中的关于经费的战争，我几乎无法相信现在所处的状况：布赖恩站在舞台之上，向四千多名现场观众描述规范理论，同时又通过视频会议与CERN各方面的科学家（包括STFC的行政总裁）对话，每个人都笑逐颜开。而我们甚至还没有发现任何东西。就像一个梦，而且是个美梦。

那一天，我们也举办了 ATLAS 圣诞节晚宴。晚宴在泵房举行。对于此类活动，泵房还是合适的。那时候，我因为太疲倦，没有力气替《卫报》撰写任何有意义的文章，所以就写了一首打油诗，总结了目前的主要结论：

> 物理学家遇见稀奇事一码，
> 赶紧电话把家打："猪飞上天了！妈！"
> 她说："猪飞上天？
> 下回你就要说见到希格斯粒子了吧！"
> 他说："不不不，那可要等到五个西格马！"

老实说，在这之前我还是个希格斯粒子怀疑论者，但现在我开始相信或许它真的存在。当然，现在也是最需要小心谨慎、最考验判断力的

时候了。

6.4　串联起震惊、凸起和无知的希格斯玻色子

目前的情况看起来和去年夏天没有什么区别。而现在的结果（虽然仍然不是决定性的）之所以更吸引人，是因为它是双光子分布结果，将会出现一个凸起。而去年夏天的“线索”是希格斯粒子的 WW 衰变模式。正如之前我描述的，这个模式并不是很适合告诉我们某个希格斯粒子候选者的质量大小。[①]W 玻色子衰变生成的中微子带走了大量信息，而我们无法观测到中微子。WW 衰变模式仍然在 ATLAS 和 CMS 中起主要作用，为线索作贡献。但现在的主要兴趣点已经转移到了希格斯粒子能够出现于探测器中的另外两种衰变模式上。

两种衰变模式都可以告诉我们希格斯粒子的质量。它们都将表现为凸起，所以比较不容易受到理论和系统不确定性的影响。这就是我现在开始认真对待该统计证据（它说“看起来像，但不确定是否存在希格斯粒子”）的原因。统计不确定性比系统不确定性更容易评判。

我们重点考虑的两种衰变模式都有一些奇怪之处，虽然原因各异。

第一种衰变模式是希格斯粒子衰变到两个光子，之前我已经描述过。[②]这里的奇怪之处在于，希格斯粒子因其质量而受人关注（也可以说希格斯粒子由质量推导出，或者说为了解释质量而发明希格斯粒子，纯粹出于言者喜好），基本粒子通过和 BEH 场的相互作用获得质量，其中希格斯玻色子是一种激发态。基于相同的原因，希格斯粒子通常倾向于衰变到质量很大的粒子。某个粒子质量越大，希格斯粒子就越有可能衰变到那个粒子，因为它们的相互作用更强。反过来，无质量

① 参见 4.3 节“勘查和测量”。

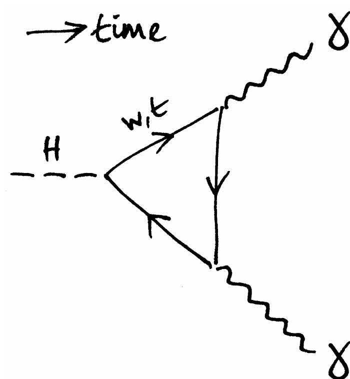
② 参见 5.1 节“为什么‘凸起’意味着玻色子？”。

的粒子无法和希格斯粒子相互作用。

所以为什么会衰变到光子？光子是光的量子，它们没有质量。它们不应该和希格斯玻色子相互作用！

确实，希格斯粒子衰变到光子的情况很罕见。如果希格斯玻色子的质量是 125 GeV，10 000 个希格斯粒子中能够衰变到光子的少于 10 个。它们大部分将衰变为底夸克，被包围在强子喷注中（含有底夸克的喷注称为 b-喷注）。但很难将这些喷注和其他不含有希格斯粒子的对撞碎片区分开。喷注（甚至 b-喷注）在 LHC 中比比皆是。如何将希格斯粒子衰变为底夸克的对撞事例从中筛选出来是我和加万、亚当、马蒂厄在临近 LHC 启动之时写的某篇论文的主题[①]，而在写下这句话时，我们仍然没有成功解决这个问题。还需要等待更高能量的数据。

和 b-喷注不同，未被其他东西包围的高能光子对非常稀有，对它们的测量也可以更精确。但由于光子的质量为零，希格斯粒子根本不会衰变为光子。确实，它不会直接衰变为光子。它需要通过圈图，借助其他粒子衰变，如下图所示：



希格斯粒子衰变为两个光子的费曼图

① 参见 1.7 节“第一次‘提速’会议”。

这就是衰变比率很低的原因。回顾之前的微扰理论，三个粒子相遇的顶点对应于一个小于 1 的数字（耦合常数），而一圈图含有的顶点（三个）比直接衰变的顶点（一个）多。所以衰变为光子的概率非常小，但仍然可能发生。在量子力学中，任何可能发生的过程都需要包含在你的计算中。在圈中出现的内线粒子甚至有可能是我们从未见过的新粒子，虽然在标准模型中，它们通常是 W 玻色子或顶夸克。

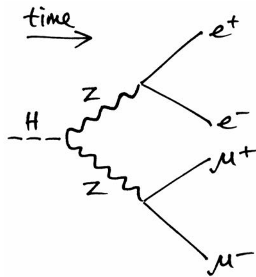
另一个重要的衰变模式是希格斯粒子衰变为一对 Z 玻色子。如果每个 Z 玻色子衰变为一个带电轻子对，具体说就是一个电子和正电子或一个 μ 子和反 μ 子，那么这也将成为某个罕见事例的明显特征。我们可以精确测量生成的四个轻子，利用它们重建“希格斯粒子”候选者的质量。

看起来没什么问题，除了……我们发现的线索预示着希格斯粒子的质量是 125 GeV。别忘了，质量就是处于静止状态的能量。Z 玻色子的质量是 91.1876±0.0021 GeV。所以为了生成两个实 Z 玻色子，需要 182.38 GeV 的能量。而希格斯玻色子没有足够能量，它还少了 57 GeV。

解开这个谜团的关键在于前句话中的“实”（real）这个字。“实”粒子代表着这个粒子能够在我们实验的时间尺度上存在较长一段时间。从这个意义上讲，此处的 Z 玻色子并非实粒子：它们存在 10^{-23} 秒（一百万亿分之一纳秒）后就发生衰变，而且只通过轻子对质量分布图上的凸起显露踪迹。只有轻子是实粒子。[①]

这个过程的主要费曼图如下所示：

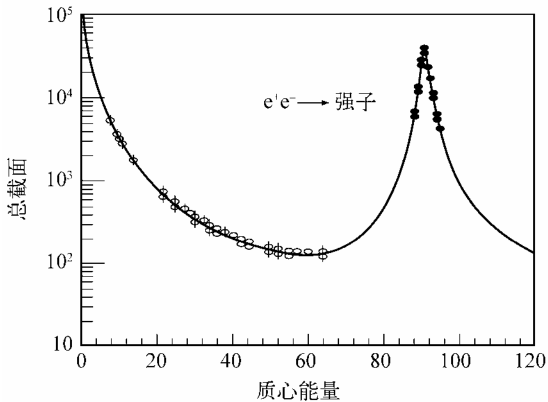
① 参见“术语：费曼图”（第 146 页）。



希格斯粒子衰变为两个 Z 玻色子,后者继续衰变为四个轻子的费曼图

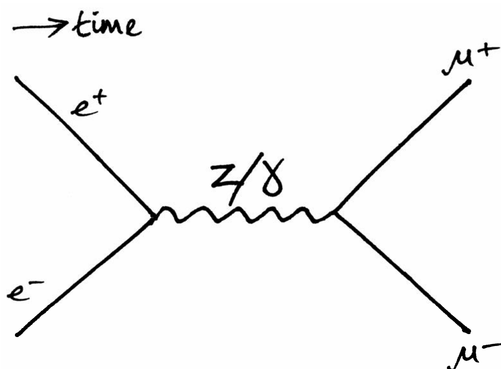
在费曼图中，只有入射粒子和出射粒子是“实”粒子。所有内线粒子，包括此处的 Z 玻色子、希格斯粒子、所有在前一个费曼图的圈中出现的其他粒子，都是“虚”粒子。它们会产生影响，它们的贡献可以通过测量实粒子而推测，但它们无法被唯一确定。在此处最重要的性质是，它们受到的约束较少。具体说就是，它们并不需要拥有正确的质量。

请看下面的图表，它总结了我们对 Z 玻色子的许多认识：



数据来自 CESR（美国康奈尔）、DORIS（德国 DESY）、PEP（美国 SLAC）、PETRA（德国 DESY）、TRISTAN（日本 KEK）和 LEP（瑞士 CERN）

别忘了，凸起有可能意味着玻色子。[1]上图中的凸起是 Z 玻色子，它在世界各地的正负电子对撞机中都有发现，包括一直运行到 2000 年的 LEP2 对撞机（它所在的隧道现在被 LHC 占据）。横坐标是对撞电子对的总能量，它等价于正负电子相互湮灭所生成虚粒子的质量，在下图中用 Z/γ 标记：



纵坐标是截面，代表着在给定入射电子和正电子的亮度下，这种对撞发生的次数。在大约 91 GeV 能量的地方有个凸起，意味着 91 GeV/c^2 的质量。[2]这归因于 Z 玻色子的贡献。在某种意义上，它就是 Z 玻色子。

你可以从这个图表中解读出大量物理信息。电子和正电子相互作用的最主要方式已经在上面的费曼图中表示出来——它们或者衰变成光子（γ），或者衰变成 Z 玻色子。实光子的质量为零。如果费曼图中的虚粒子能够拥有正确的质量，则相应过程发生的概率将大大提高。所以在图表的左边，质心能量接近零的地方，对撞的概率（总截面）非常高。在右边，随着能量提高，光子被迫越来越偏离它的正确质量，

① 参见 5.1 节“为什么‘凸起’意味着玻色子？”。
② ……要是你不习惯自然单位制（其中 c=1）的话。

所以截面迅速降低。直到大约 60 GeV 之处，截面停止下降，重新开始上升。这是因为生成的 Z 玻色子开始接近它的正确质量。这提高了对撞的概率，导致了 91 GeV 的大凸起。之后，随着能量继续提高，费曼图两顶点中间的虚粒子质量越来越偏离 Z 玻色子的质量，所以截面又开始降低。

即使希格斯粒子的质量小于两倍 Z 玻色子的质量，它衰变成两个 Z 玻色子的过程仍然很重要。原因也在上面图表中。设想一个 Z 玻色子在峰值处生成，拥有正确的质量 91 GeV。为了保证能量相加等于希格斯粒子的能量，另一个 Z 玻色子的质量必须是 34 GeV 左右。从图表中可见，在此质量上轻子对生成的概率远大于零。LHC 也得到类似不等于零的结果。在图表中，34 GeV 处看起来最有可能是光子，而我们知道希格斯粒子并不直接衰变成光子。但它可以衰变成 Z 玻色子，因为 Z 玻色子质量很大。在 34 GeV 处，确实有一些“虚”Z 玻色子生成。关键要点是，Z 玻色子的峰值并不只是 91 GeV 处的一条细线，它还有宽度。因此，一个 125 GeV 的希格斯粒子可以衰变成两个 Z 玻色子，只是其中一个 Z 玻色子并不拥有正确的质量。所以即使希格斯粒子没有足够能量生成两个实 Z 玻色子，它衰变成两个 Z 玻色子的过程仍然起着重要作用。

鉴于这些匪夷所思的事情，我们需要时刻提醒自己测量的对象究竟是什么：它们是轻子。实际上，我们无法确定某个给定的正负电子对是来自光子还是 Z 玻色子。正如在之前的“术语：费曼图”（第 146 页）中提到的，我们很容易被这些费曼图诱骗。虽然它们是物理过程超级直观、优美的表示，但它们并不类似斯诺克击球的慢镜头回放。它们不代表给定对撞中发生的某个唯一历史。

这是构成了标准模型基石的量子力学和量子场论最深刻、最古怪的特性之一。粒子物理这个名字其实名不副实。或者至少粒子并不是

我们通常所认为的那样。

费曼图代表振幅，而非概率。如果你理解这个，你就掌握了万物运行的某些秘密。有趣的是，虽然原则上所有粒子物理学家（也别理会这个名不副实的名字）都知道这个，但大部分人在日常工作中都忘记了这件事。至少对科学而言，这是很危险的状况。

为了正确区分振幅和概率的定义，最好跟随理查德·费曼的脚步，从阐释量子力学的一个古怪现象开始，即双缝实验。将波（水波、声波、光波等）传送到带有双缝的障碍物上，如果缝的宽度以及双缝之间的距离和波长差不多，在它穿过双缝后，你将看见一些有规律的图案。以水波为例，某些地方的水波将非常平静，而其他地方的水波将非常高。

这种现象称为“干涉”，它和振幅有关。波是某个东西在平均值周围所进行的振动——振动在偏离平均值某个最大距离内进行。所以如果水波的波峰在海平面以上 10 米，那么平均值是 0 米（海平面），振幅是 10 米。最小值亦如此。波谷将在海平面以下 10 米处，即–10 米。

当几个波的步调不一致时，就会出现干涉效应。假设有两个波，分别穿过障碍物上的两条缝。在某些海水区域，来自两个缝的波有可能同时到达。其中一个波峰 10 米，叠加在另一个波峰上，所以产生了 10+10=20 米的波峰——两者相加。如果两个波谷同时到达，它们也能叠加，所以产生（–10）+（–10）=–20 米的波谷。这些是相长干涉（constructive interference）的区域。[①]相反地，在某些区域，一个波的波峰和另一个波的波谷同时到达，它们相互抵消：10–10=0，所有东西都在海平面上保持静止——这就是相消干涉（destructive interference）。波的振幅处处都是 10 米，而海平面的起伏是所有振幅

① 不过要是你在一艘船上，这些区域无疑将非常具有破坏性（destructive）。

的叠加。取决于如何叠加振幅，它的大小可以从 20 米到 0 米变化。

量子场论中的情况和波一样。双缝实验的奇怪之处就在于，它不仅对水波、声波或光波（其实我们已经知道光波就是光子，有时候它表现出粒子的性质）成立，而且对电子也成立。如果将电子射击到屏幕上，你就可以测量它们，“砰砰砰”，一个一个打到探测器上，正如粒子一样（我将它们想像成非常微小的斯诺克球）。但最终它们会形成类似波的干涉图案——某些区域不存在电子，某些区域充满电子。发生了干涉效应。

电子在某处出现的概率并不正比于单个波的振幅，而正比于所有振幅的叠加。事实上，它正比于振幅叠加的平方，所以概率总是正数——–20 的平方是（–20）×（–20）=400，20 的平方亦如此。这是费曼图的使用方式。你需要计算所有对应于某一组粒子（例如某次对撞中的四个轻子）的可能费曼图。你需要将它们相加，再将相加结果平方，得到截面。[①]有时候，叠加上一个费曼图会让截面变小，因为其中发生了相消干涉。有时候又会让截面增大。而对于测量中任意给定的一组粒子，你无法分辨它们具体由哪些费曼图产生，因为任何可能的费曼图都有贡献。有时候起正面作用，有时候起负面作用。

不过，这并不是说我们无法从测量结果中学到东西（分布图中的凸起等价于双缝实验中波的干涉图案），我们可以找出双缝的具体位置。事实上，在 X 射线晶体学中，类似的干涉图案可以用来研究分子结构。罗莎琳德·富兰克林（Rosalind Franklin）拍摄的 DNA 晶体衍射照片为其他人求解 DNA 的结构提供了关键帮助。同样地，我们可以通过一些相关费曼图分析出是否存在希格斯玻色子或 Z 玻色子，但

① 参见“术语：费曼图”（第 146 页）。

我们无法分析出具体哪个图对应于哪个对撞事例。我们真正能够测量的只有末态粒子，即那些能够存在较长时间、从对撞中跑出来而在探测器中形成图案的粒子。而许多职业粒子物理学家完全忘记了这些，将费曼图看得太严肃，这确实很令人震惊。

所以不要学习他们。记住，我们在寻找四个轻子，它们存在三种可能组合。[①]利用它们的测量结果可以画出总质量图，而我们就在图中寻找凸起。这些做法和光子对的情况并无两样。

6.5 μ 子：洋葱的最后一层

在日常生活中，μ 子并不常见。至少它比光子、电子和强子罕见得多。因此，如果你在探测器中发现了一个 μ 子，其中发生了一些有趣事情的概率就已经相当大。事实上，μ 子对希格斯粒子衰变成两个 Z 玻色子过程的搜寻至关重要——在此衰变道中，灵敏度最高的结果来自两个 Z 玻色子都衰变成 μ 子–反 μ 子对而得到的四个 μ 子末态。总的来说，它们对测量 Z 和 W 玻色子同样非常重要，而在搜寻超出标准模型的物理中也起着相当重要的作用。

或许你会觉得 μ 子很容易对付。从位于探测器心脏之处的对撞点出发，直到进入 μ 子跟踪系统（围绕着对撞点的最后一层高科技仪器），期间粒子经过了内层跟踪探测器和热量计。所有带电粒子（包括 μ 子）都应该已经在内层跟踪器中得到测量，除了 μ 子（还有中微子，不过它没有任何影响）之外的所有粒子都应该滞留在了热量计中。生活应该很简单。

在某些方面，确实如此。但我们还面临着其他挑战。μ 子非常重

① 电子–正电子–μ 子–反 μ 子、电子–正电子–电子–正电子，以及 μ 子–反 μ 子–μ 子–反 μ 子。

要，μ 子探测器在任何实验中都具有最高优先级。CMS 中的“M”来自 μ 子（muon），而 ATLAS 中的“T”来自 ATLAS 的 μ 子系统中的超环面（toroidal）磁铁，这些命名不可能是巧合。在两个探测器中，μ 子系统都处于最外层，而且是探测器中最大的部分，你一眼就可以看到。它不可能只是用来作秀的，你说呢？

我们面临的挑战之一是，虽然探测器深藏地底，但还是有一些来自宇宙射线和背景辐射的粒子能够击中 ATLAS 的最外层，而 μ 子探测器就在那里。不过最主要的挑战恐怕还在于，我们需要用东西覆盖内层跟踪器和热量计外围的弧形表面。虽然我们可以像对待内层跟踪器一样，用半导体覆盖弧形表面，但这将非常昂贵，而且毫无意义，因为大部分硅片大多数时间都无用武之地。

真正需要的其实是某种非常精确、反应迅速的技术，而且能够经济地覆盖很大面积。在 ATLAS 中，大部分 μ 子系统使用了“受监控漂移管”（Monitored Drift Tubes）。它本质上就是一段很长的、带负电的金属管，直径约为三厘米，正中心是一条带正电的电线。管中充有气体，当一个 μ 子经过时，它将从气体分子中撞击出电子，并使其电离。电子和离子分别向阳极和阴极漂移，生成一个脉冲，从脉冲中我们可以确定 μ 子的位置。μ 子系统的某些部分还有另一种不同的设计（阴极室），但它们的原理（气体电离，外加电压使电子和离子漂移）并无区别。CMS 的 μ 子系统使用了一种混合的技术，但原理仍然一样。ATLAS 和 CMS 两者都有巨大的磁铁，它们将带电 μ 子弯曲（这时 μ 子已经远离包围内层跟踪器的超强磁场线圈）以便各个 μ 子的动量得到独立测量。

高动量 μ 子的轨迹是预示 LHC 中发生了有趣事例的最清楚、最精确的测量信号（彩图 6）。μ 子在内层跟踪器中就被测量，它穿透热量计，深入 μ 子系统，留下轨迹。正如我提到过的，在希格斯粒子衰变

成四个轻子过程的关键性搜寻工作中，μ 子是决定性因素。

6.6　它是什么？

在量子力学中，人们首先需要清楚地描述实际看到的情况，然后讨论对它们可能的解释。鉴于这种微妙性，当我们确实发现一些新东西时，我们就需要面对反复再三的提问：“它是什么？”尤其是：“它是标准模型的希格斯玻色子吗？”而答案将会五花八门。

要证明某样东西和实验完全吻合是不可能的事情。“完全”是一个具有无限精确度的表述，所以如果你要证明“完全”，最好求助于数学家而非科学家。你永远无法知道一根绳子精确的长度。事实上，科学的提问方式是：“它的性质和希格斯玻色子是否一致？”在称它为希格斯玻色子之前，你需要确定有多少东西需要保持一致，要精确到什么程度。这是一个判断的问题。

在希格斯玻色子的问题上，标准模型展现出了惊人的预测能力。首先，它预测了希格斯粒子的存在。其次，希格斯粒子必须具有零电荷和零“自旋”（即没有内禀角动量——它是标量玻色子）。标准模型无法很好地预测希格斯粒子的质量，但一旦质量确定，其他东西也都能够确定，包括精确预测它衰变后生成什么粒子。这整件事的关键是确定这些粒子的质量。而这也通常意味着，在假定衰变可以发生以及能量守恒的前提下，粒子质量越大，就越有可能在希格斯粒子衰变中生成。

当然，在 2011 年我们没有得到显著信号。然而，我们确实发现了一些苗头，表明在约 130 GeV 的希格斯粒子质量的区域，数据本**可能**与希格斯玻色子存在的假设不一致。但最终发现数据仍然保持一致。这个结论主要来自与预测的事例比率的对比。我们也知道了一些有关

事例分布的事情，得到了一个可能的但仍不确定的质量峰值。

若要称这个峰值为“希格斯玻色子”而非“超额现象”或“候选者”，我们不仅需要更高置信度确认它的存在，还需要测量它的更多性质。其中主要的任务是观察待定粒子（假设它确实代表着某粒子）以至少两种（越多越好）不同方式衰变。如果相对衰变比率看起来吻合希格斯玻色子的情况，它就会更令人感兴趣。当然，若有更多衰变模式，进展也会更大。我们测量得越多，讨论结果就越有可能从“可能超额”到“希格斯玻色子候选者”再到“标准模型希格斯玻色子”移动。

然而，即使确实发现了一些东西，我们也做不到指着某个对撞事例的图片跟你说：“这个事例肯定包含一个希格斯玻色子。”这多少有些令人尴尬，但背后的原因为我们提供了一种解决一个严重的父母困境的方法，解释了为什么有时候我就是一个牙仙。请听我慢慢解释。

希格斯粒子的一个正在发展的线索是双光子质量分布图上的某个小凸起。我完全可以向你展示一个对撞事例，其中包含了一对精确给出“希格斯粒子质量”（即位于凸起的顶端）的光子。但我仍然无法信誓旦旦地说某一对光子来自希格斯玻色子。粗略地讲，如果在峰值处约存在 70 个事例，很可能只有 10 个来自于新玻色子。利用我们的探测器，我们无法区分这 10 个事例和其他 60 个背景事例。事实上，即使拥有一个完美的探测器，其中一些背景事例仍然可能存在，而且它们以量子力学的方式与信号混合。能够确信的只有进去的东西和出来的东西。你只能测量这些东西。

一组入射粒子有可能通过许多种不同方式生成一组新的粒子，但如果生成的是相同的一组粒子，在物理上就没有多大意义区分它究竟由何种方式生成。为了计算结果发生的概率，你需要以某种特殊方式叠加所有的可能性。

现在说说这个父母困境。在圣诞节之时这个问题尤其敏感，但如果你有一个正在换牙的孩子，你就得时刻面对这个困境。他们会问：圣诞老人是真的吗？牙仙是真的吗？

剥夺他们的快乐或者对他们撒谎，你如何选择？对我而言，有时候我非常不愿意对自己的孩子们撒谎，破坏我们之间的信任感。但另一方面，我也不愿意成为剥夺他们幻想的恶魔。下面就是我的解决方式。

任何具有相同初态（牙齿）和末态（零花钱）的事情都有可能是一个存在牙仙的事例。换句话说，任何带走牙齿、送来零花钱的东西都和牙仙拥有相同的本性，在一定程度上，它可以被称为牙仙。[①]

现在我的儿子当然不会再相信这种童话。但在他小时候，这就是**真理**。我们让这种观念的转变在没有谎言、背叛和眼泪的情况下发生。事实上，当我拿着一枚闪闪发光的硬币偷偷进入他的卧室，我就是牙仙。当然，同时我也是父亲。这似乎很有效果，而现在他长大了，说起来仍然很有趣。

很容易将此推广到圣诞老人的问题，这也解释了为什么有时候圣诞老人和你的父母都用了相同的包装纸——在某种意义上，圣诞老人和你的父母是在运送礼物过程中不可区分的量子可能性。

或许吧。不管怎样，在物理中，“它是什么？”的回答永远是：“它是一个看起来像是某某的东西。”而我们越来越确信，我们正在接近某个看起来非常像是希格斯粒子的东西。

---

① 既带走牙齿又带走钱的东西最有可能是牙医，或者强盗。

第七章

逼近

（2012 年 1 月—2012 年 6 月）

7.1 8 TeV

很显然，在这些诱人的线索出现之后，采取进一步行动、无论如何都要给出答案的压力陡然增加了。BBC 也过来凑热闹，准备为《地平线》（*Horizon*）节目制作一集纪录片。刚开始定位于粒子物理，但后来越来越聚焦于希格斯粒子的搜寻，因为很明显，情况正朝向希格斯粒子的某种结论而推进。

2012 年 2 月 7 日，去年 12 月公布的希格斯搜寻结果被投递到了杂志和 arXiv。[①]从 12 月的报告到现在，中间经历了各种相互验证、大量研究工作（以及圣诞节），但最终结果并没有多大变化。经过同行评议，ATLAS 和 CMS 的论文得到正式发表，这算是为我们之前所展示的结果提供了一种事后验证。

在论文发表的同一天，我去谷歌伦敦了（谷歌办公室，我不是用谷歌搜伦敦，我知道伦敦在哪）。我去那里吃早餐，同时参加一部有关

① 参见：http://arxiv.org/abs/1202.1408；http://arxiv.org/abs/1202.1487.

CERN 的电影首映。其中有两件事值得一说。我遇见了菲利普·格里尼什（Philip Greenish），他是 STFC 委员会曾经的成员以及英国皇家工程院的行政总裁。在他任内，皇家工程院（在经费削减讨论的一些关键时期）曾提议粒子物理应该接受经费削减的冲击。他在一个和 LHC 有关的首映式上出现以及他的一些发言似乎暗示着，我们或许应该远离那种自相残杀的状况了。同时，我很喜欢电影中的一个小片段。那个片段拍摄了 ATLAS 户外烧烤活动时的一个美国同事扎克·马歇尔（Zach Marshall）。他在电影中评论了理论物理学家之所以大胆设想或许会在大型强子对撞机中出现的各种奇怪新物理情形：

> 有一些人，他们试着去预测，而且尽其所能预测一切不一样的东西。因为只要其中一个预测正确，他们就会扬名立万。而即使全部预测都错了——他们仍然能够和普通人一样生活！

他说得没错。所以这就是现实。实验物理学家即使做对了，也会被忽视（例如纠正中微子速度的测量），而一旦错误，就会被大量引用批评。理论物理学家如果做错了，他们会被忽视，而一旦对了，就能获得诺贝尔奖。

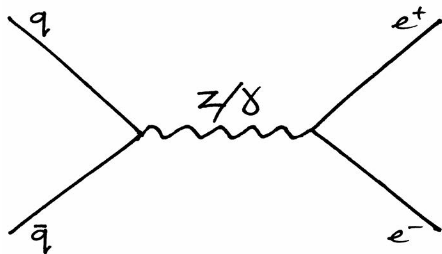
当然，这样说不完全对，但也不完全错。

4 月 5 日，LHC 重新开始为我们输出数据。为了启动新的对撞，我们做了大量准备工作，因为现在对撞的质心能量已经从 2011 年的 7000 GeV 增加到了 8000 GeV（每个粒子束的能量为 4000 GeV）。这是一个好现象——比如，更高能量意味着我们有更大概率生成新粒子，因为能够生成的最重粒子的质量为 $m=E/c^2$，其中 E 是能量，c 是光速（读者可以尝试将这个公式重新变换为著名的爱因斯坦质能方程）。但能量的改变也意味着我们需要重新检查模拟程序，确信它们在新能量

区域能同样工作正常。

2 月的时候，我给一群 16—19 岁年龄段的学生开过一场讲座。这是英国物理学会“物理学展望”系列活动的一部分。在讲座中有人问我，如果质子–质子对撞的质心能量有 7000 GeV，为什么能够探索的新粒子（包括希格斯粒子）能量远小于 7000 GeV？

在希格斯粒子这个具体问题中（其中的大部分研究都在 130 GeV 能量之下），虽然确实有大量可利用的能量，但我们面临的真正困难在于如何将希格斯玻色子从背景中筛选出来。对于更一般的情况，ATLAS 和 CMS 能够做出类似在 6.4 节展示过的数据分布图。但在 6.4 节，物理过程是一个电子和正电子湮灭生成光子或 Z 玻色子，后者再衰变。而在此处，入射粒子是夸克和反夸克，如下图所示：



正如你所知的，在质子中除了夸克，还有大量反夸克和胶子。[①]反夸克就由此而来。在 ATLAS 和 CMS 的图表中，91 GeV 的地方有一个来源于 Z 玻色子的凸起，这和电子–正电子的图表一致。但 LHC 将我们带到了更高的能量领域——达到 1500 GeV，而 LEP 只能达到 100 GeV。在 LEP 的后期运行阶段，LEP2 能够达到 210 GeV，但那已经是极限，是粒子束在 LEP2 上能够达到的最高对撞能量。然而，即使 LHC 在寻找凸起的研究中能够传递出 8000 GeV 的对撞能量，它实际上也

① 参见 4.5 节“质子内部”。

无法达到这个设想的极限。为什么呢?

因为质子不是基本粒子。超短距离、能量最前沿的物理其实发生在比质子直径小很多的距离范围内。从这个角度看,LHC 等效于夸克、胶子对撞机,而非强子对撞机。而且不幸的是,虽然质子的能量高达 4000 GeV(所以可利用的能量高达 8000 GeV),但每个夸克或胶子只携带一定比例的质子总能量,所以能够用来生成新粒子的能量通常只有质子能量的十分之一到五分之一。

7.2 会议的诅咒

2012 年的夏季会议季注定将成为希格斯粒子搜寻的分水岭。虽然看似不可能,但会议的频率确实大大增加了。

考虑到时区的原因,几乎可以说,无论是欧洲正常的工作时间还是晚上的大部分时间,你都有可能在 ATLAS 会议中度过,因为每个人几乎都以各种形式的电话会议相联系。只要有足够多的网络连接数,你可以同时参加六七个电话会议,耗费一天的大部分时间。这些事情简直会让你脑袋爆炸。

更糟糕的是,一种奇怪的现象开始出现:每当会议开始变得有趣时,其中的一个参与者(通常是主持人)几乎总会建议他们“线下交流”。之后我们继续下一个话题。

下面就是会引发这种奇怪现象的几种情况。

1. 突如其来的蠢蛋

有人(有可能是一些资深物理学家,例如我)完全不了解讨论或展示的要点。他们会问一些非常无知或曲解的问题,以至于其他人只能尴尬地盯着鞋子或天花板。其中的一种情况是,有人问了一个非常

基本的问题（例如“我们到底对撞了什么粒子？”），基本到其他人只能假设他在大街上进错了门才出现在这里。不管怎样，尽职的主持人会马上挂断这种讨论，以免大家尴尬。

2. 针锋相对的争斗

这个世界上并没有多少粒子物理实验。如果作为一个博士生，你遇见过一个傲慢自大、饱受达克效应[①]折磨的人，那么在今后的职业生涯中，你将时不时遇见这个人，挥之不去。如果他们在会议中问了一些愚蠢、乏味又充满敌意的问题，对其他参与者而言，这将演化为一场可笑的市井争斗，而主持人通常会第一时间将其挂断。你肯定会认可这种决定。或许他们应该将问题带到漆黑的走廊中，叫上一班兄弟：“咳咳，乔恩让我们过来解决掉你刚才问的问题……”

3. 技术性细节

老实说，这种情况正是研究进展得以发生的地方。对于某个刚提出的问题，会议中的某人刚好是这方面的专家，他丰富的知识恰好能够解决问题。而且确实，通常某个人刚展示完结果，就有人意识到这里面需要仔细核查。他们倾向于组织一个小型会议解决问题，而不愿冒着解决失败的风险在其他同事面前讨论。而且问题的解决有可能需要好几天。所以线下讨论吧。

4. 垃圾网速

有人的说话声音突然变得很奇怪，就好像他吸入了氦气，变成了《神秘博士》中的赛博人（Cyberman）或者将脑袋钻进了水里。垃圾的网络连接或者坏掉的麦克风常常被认为是罪魁祸首，虽然我一直怀

① 全称邓宁–克鲁格效应（Dunning-Kruger effect），表现为虚幻的自我优越感认知。和更常见的“冒牌货综合征”（Impostor syndrome）刚好相反。

疑赛博人至少需要为其中一些事件负责。虽然毫无疑问电话会议设备通常是祸因，但当你不小心卷入上面几种情况中时，这也不失为一个很好的挡箭牌。它几乎总是迫使人们挂断。

搞笑的是，几乎在所有情况中，“线下讨论”都意味着“继续通过一系列长篇大论的电子邮件进行交流”。所以或许我们也没有那样洒脱。

瑞士有很多值得称道之处。它的国旗是个大大的加号。而且（或许是对 CERN、联合国和世贸组织无尽会议的应对）某个瑞士政党在 2011 年成立，它宣传的政策就是禁止使用幻灯片。所以人们开始讨论各种紧急应对方案，包括将所有会议挪到 CERN 在瑞法边界法国一边的普雷维辛（Prévessin）园区举办，或者强制推广（很显然，这会很受欢迎）一个更严格的“只允许 LaTeX[①]”政策。

当然，它们仍在会议讨论中。

7.3 波

《天使与魔鬼》是丹·布朗的畅销悬疑小说，也是影星汤姆·汉克斯出演的改编电影。CERN 在其中很多地方出现。当人们向我问起它时，他们的一些想法总要被我纠正。

“是的，是的，我们当然没有私人飞机、跳伞训练塔这些玩意。”我回答。

“我甚至没有白大褂。那只是虚构小说，开心就好！”我回答。

“你说什么？反物质？噢，那显然是真的。”

事实上，反电子（即正电子）、反质子和其他反粒子即使在普通能

① 不，我不是说什么奇怪的着装标准。LaTeX 是一个排版软件，被科学家广泛使用。事实上，我倒是希望自己能用 LaTeX 撰写这本书。

量的物理设施中也是很常见的东西。甚至在医院的 PET（positron emission tomography，正电子发射型断层成像）中也有。PET 是一种诊断技术，将某种元素的放射性同位素引入体内，利用其衰变发射的正电子获取诊断信息。

质子数相同但中子数不同的原子互为同位素。原子核的放射性衰变时间由其内的中子和质子共同确定，但元素的化学性质取决于电子数，而电子数由质子数确定，以保证正负电荷相消，最终得到电中性的原子。因此，包含六个质子、五个中子的不稳定同位素碳-11 和包含六个质子、六个中子的稳定同位素碳-12 的化学性质完全相同。

这意味着，糖或蛋白质的分子和化合物可以含有碳-11。这种糖或蛋白质和普通的没什么两样，但碳-11 在一段时间后会发生衰变，发射出一个正电子。

在人体内游荡时，这个正电子很快会遇见另一个电子，两者相互湮灭，生成两个光子。每个光子的能量都非常接近电子质量乘以光速的平方（又是质能方程），以粒子物理单位衡量就是 0.51 MeV。通过测量这些光子，可以非常精确地（只需要很低剂量的辐射）描绘出同位素在体内的位置。若精心选择某种同位素和分子，就可以非常详细地了解身体状况。

相比反电子，反质子更难生成，因为它比反电子重约两千倍，生成它也需要多约两千倍的能量。话虽如此，以粒子物理的标准，这仍然是可实现的。问题是，若要生成反质子，必须借助于对撞，通常是将质子束撞击到某种材料上。当反质子由此生成时，它们运动得异常快。所以困难之处在于捕获它们、将它们减速、储存甚至（如果你有这种计划）将它们同正电子结合构成反氢。

整个过程中，你都需要阻止它们和周围的普通物质发生湮灭。最后，如果你想知道自己捕获到的究竟是什么，还需要将它们保存足够

长时间，以便研究它们的性质。

CERN 的 ALPHA（Antihydrogen Laser Physics Apparatus，反氢激光物理仪器）实验组完成了这些工作，并在 2012 年 3 月发表了他们的结果。他们不仅捕获到了反氢的原子，还用光子（在此情况中即微波）撞击它们。这些光子让反氢中的正电子改变了能级。它们能够让正电子的自旋改变取向，使它和质子的自旋同向（或反向）。在此情况下，反原子的磁场性质将发生改变。这意味着，它将脱离束缚状态，之后发生湮灭。

在以上过程中所使用的微波频率不是任意的，它对应于反氢原子中各种能级的间距大小。在测量的精确度范围内，这些间距大小和普通氢原子的完全相同。

这是人类首次对反原子内部结构进行测量。测量结果（“看起来和普通原子一样”）并不意外。如果看起来不同，才算是意外。物质–光子相互作用和反物质–光子相互作用之间的对称性根植于现有理论之中。狄拉克方程将量子理论和狭义相对论相结合，而反物质的存在是狄拉克方程的必然结论。只要狄拉克的理论是正确的，电子的电荷就必须**分毫不差地**与正电子的电荷相反，而它们的质量必须等同。我在这里想强调的是，即使刚开始的测量不是很精确，即使理论已经告诉了我们答案，但这是第一次完成的实际测量。更精确的测量很快就会跟上。而即使是已经反复被验证的理论，它给出的预测和推论也不是和实际测量属于一类。

反物质光谱学的研究刚刚开始。而另一方面，物质光谱学的研究已经有很长的历史，它是科学一个非常精彩的分支，拥有深刻内涵和广泛应用。通过光谱学，我们可以知道恒星和星系的成分，而某些元素的光谱中明显不同的发射谱线或吸收谱线是当时激发量子力学研究的主要谜团。

因为电子是费米子[1]，所以它们在原子中无法处于相同的量子态。这意味着它们无法拥有相同的能量。还有一个更深刻的性质：它们都必须处于“量子态”。这意味着，当电子被束缚在原子核中时，它们只能拥有某些特定的能量值。因此，如果你想将电子从低能态移动到高能态，你就必须精确地输入所需大小的能量。对于光子而言，固定的能量意味着固定的波长,即固定的颜色(如果此光子属于可见光光谱)。以上就是光谱学的核心内容。

如果一团原子处于极高温度中，譬如在恒星中，它们将持续不断地相互碰撞、交换光子，而它们外层电子的能级将不断变化。设想两个具体的能级（譬如在街道的钠灯中[2]），它们的能量间隔大小是个固定的数值，在此例子中对应于黄光的波长。如果你将钠灯的光线分解为不同的波长（如同牛顿利用三棱镜分解太阳光），你就会看到一条亮带，它对应于电子从高能级跃迁到低能级、释放一个光子。

氦元素就是根据这个原理在 1868 年的一次日全食中从太阳光里发现的。法国天文学家皮埃尔·朱尔·塞萨尔·让森（Pierre Jules César Janssen）在 587.49 纳米波长处发现了一条亮带，它对应于 2.11 eV 的能量，而且恰好也是黄色的，非常接近纳线。几个月后，诺曼·洛克耶（Norman Lockyer）也发现了这条亮带，而且正确地指出它来自某种当时在地球上尚未发现但存在于太阳中的元素。因此，它被命名为氦（Helium，源自希腊语 Helios，意为太阳）。直到 14 年后，意大利科学家路易吉·帕尔米耶里（Luigi Palmieri）才在地球上发现氦。

对光线中的带（它们有时候是“发射谱线”的亮带，电子跃迁到低能级，所以释放出更多光子；有时候是“吸收谱线”的暗带，电子为了跃迁到高能级而吸收了特定波长的光子）进行的光谱学分析可以

① 参见“术语：玻色子和费米子”（第 32 页）。
② 我在 2.1 节使用过这个例子。

（在地球上的实验室中）用来鉴定材料样本中微量的元素或化合物。它们同样能够告诉我们远在太空中、人类永远无法触及的物质的组成成分。不可思议的是，当某样东西远离观察者运动时，它的谱线图案会整体往低能方向移动（因此波长变长，往光谱的红色端移动，即“红移”）。红移效应让我们相信宇宙正在膨胀：所有遥远星系的谱线特征图案都往较长波长的方向发生了偏移，所以它们都在远离我们运动。

光谱学对我们大有帮助,但它只是物理学中波的概念的一个方面。波或许是物理学中最精彩的部分，它无处不在。在解释为何原子外层存在着电子的不同能级时，电子表现为波的形式这个事实在最早期研究中起着非常重要的作用。尼尔斯・玻尔提出，电子只能在一些固定轨道上围绕原子核运动，而决不允许出现在这些轨道之间，并且据此建立了第一个能够解释光谱学中谱线问题的原子模型。

如果将电子看成波，你就不难理解为什么会存在一些固定轨道。在这些轨道中，轨道的周长恰好等于波长的整数倍，所以当波沿着轨道传播时，每个波刚好叠加在一起，形成“驻波”（standing wave）。而那些无法完全吻合的波会在轨道每一处都出现波峰和波谷、相互抵消，因此那些波长对应的能量不存在。

驻波听起来有些神秘。在求解围绕原子运动的电子的薛定谔方程时，其最终答案的量子力学图像最接近于驻波。而且在日常生活尺度，它也是一些乐器的工作原理。譬如，竖琴的一根弦发出一个基准音，对应于弦的振动，振动波长是弦长的两倍。其中实际发生的事情是，弦被拨动而产生的波往弦的两个方向运动，在弦的两个固定端被反射回来、相互叠加（干涉）。正如玻尔的电子，如果峰值完全吻合，波就能留存，而那些不能完全吻合的波将相互抵消。因此，不同的弦可以发出特定的音。

在伦敦巴比肯艺术中心的一次音乐会上，我发现我的意识不由自

主地流向了物理。请不要将此解读为对音乐会的批评，演奏确实极为精彩。但每当沉浸在美妙的音乐中，我就会浮想联翩。伦敦交响乐团的标志确实很像一个指挥拿着指挥棒，它也让我联想起了苏珊娜的颧骨。我思考作曲家席曼诺夫斯基会如何处理后面的元音，又幻想着像巴托克一样在欧洲深陷战争恐怖时仍坚持创作美好。终于，在巴托克的第二小提琴协奏曲演奏到一半时，我的思绪飘到了物理和竖琴。

管弦乐队有两把竖琴。竖琴有着优美的弧线，外形几乎是三角形，但上端是一条独特的曲线。为什么要做成那样的曲线？或许因为那样很漂亮。但由于曲线关系着弦的长度，而长度又关系着弹奏的音符，所以或许也不纯粹为了装饰。

波可以由四种特性描述：波速、频率、波长和振幅。你也可以加入第五种特性，即波的形状，它关系着音色等微妙之处。小提琴制作师斯特拉迪瓦里就是因为擅长处理这些微妙之处而名利双收。但作为物理学家，我尽量让事情更简单。

振幅没有多大意思。它就是波峰的高度或波谷的深度。所以对于声音而言，它基本上就是波的最高压力点和平均压力点之间的压力差，称为音量（volume）。[①]

波速、频率和波长之间相互关联：波速等于波长乘以频率。事实上，波速是传递波的介质的一种性质。空气中的声速（在室温和标准大气压的条件下）是固定的 1236 千米每小时。所以对于声波，频率一旦确定，波长也就随之确定了。

频率就是我们听到的音高。当竖琴的弦被拨动时，它会以某个频率振动。振动将引发共鸣箱的共鸣，使其中的空气有规律地压缩膨胀，因而发出相同频率的声波，在乐师的妙手之中变成音乐。

① 我不知道为什么 volume（原义是体积）被用来表示声音的大小。但放大器（amplifier）确实可以增大振幅（amplitude），还是很恰当的。

弦振动的频率由弦长、弦的张力以及制作材料确定。如果所有弦都由相同材料制作（因此拥有相似的音色），拥有相同的张力（因此被拨动时产生相同效应），那么为了发出更低沉的音，你需要增加弦长。不幸的是，每减少八度音，弦长就需要加倍。这意味着长度的指数型增长。

三角形的竖琴如果没有上端的曲线框架，它的弦长将是线性增长而非指数型增长。在此情况下，为了涵盖足够的八度音，需要将竖琴做得非常大，很不实用。而竖琴上端的曲线框架在我看来就是为了让弦长呈指数型增长，同时保证乐器的可操作性。所以对于最短的一些弦，它们可以拥有相同的张力、由相同材料制作，沿着琴框等距排列。但如果照此规律排布后面的弦，你将发现在达到下一个八度音前，琴弦就已经太长了。因此，琴框上端的曲率需要改变，制作弦的材料也需要改变，以保证频率呈指数型衰减，容纳更多八度音。所以那段优雅的曲线不仅有装饰作用，还很实用。

我经常用竖琴或低音提琴的弦做类比，解释为什么需要在高能对撞中研究物理。当然，我也可以说出其他理由。例如，因为 $E=mc^2$，所以需要很多 E 才可以生成质量很大的新粒子。再比如，因为我们想要探索大爆炸后一瞬间早期宇宙的物理[①]，而当时的能量非常高。不过，我最喜欢的理由还是波和分辨率。

这要从一个问题开始：光是波还是粒子？电子呢？胶子呢？

在波粒二象性的问题上，我给自己的答案是“都不是”。或者说，我告诉自己，波和粒子的概念都是用日常生活的东西对量子世界的东西所做的不完美类比。所以，“粒子”描述了光子或电子某些行为方式，而“波”描述了它们另外的行为方式。而真正的本体其实是量子场的

---

① 参见 4.6 节“圣诞节的重离子”。

激发态。[①]

当然，量子有能量、动量、波长和频率，而它们之间都相互关联。能量正比于频率，动量正比于波长的倒数[②]，所以高能量意味着高频率，高动量意味着短波长。当你讨论诸如 LHC 这样的高能对撞机时，动量也正比于能量。综上所述，高能量对应于高动量对应于短波长。

波长决定了分辨率，即你所能看见的最小物体。雷达的波长为米的量级，所以它擅长于发现船只和飞机。但如果人眼的灵敏度和雷达一样，我们就无法看见彼此，因为人比雷达的波长小。可见光的波长是几百纳米，所以它对人类更实用，让我们能够看清细节。而且幸运的是，这也是太阳辐射的峰值波长。当然，鉴于人眼本来就是为了适应太阳最主要的波长而进化的，假若太阳主要辐射红外线，我们就会进化出对红外敏感的眼睛，而所有微米以下的东西看起来都会变得模糊。这对穿针引线显然不是什么好事。

LHC 生成了有史以来实验室中最高能量的粒子束，因此获得了有史以来最小波长的量子（主要是胶子），也因此让我们可以在从未触及过的最小距离探索大自然。我们不仅深入了原子核内部，还深入了原子核中质子的内部，更深入了质子中夸克的内部。而且如果夸克也有内部结构，我们或许还能更深入。这就是我心目中的“能量最前沿”。这也是我们利用大型强子对撞机之类庞然大物来研究夸克之类细微之物的原因。正是因为（即使在如此小的尺度）夸克和电子看起来并非由任何其他东西构成，质量起源的谜题才会出现。在 LHC 能够探索的尺度，我们要么发现夸克和电子并非基本粒子，它们还由其他东西构成，要么找到赋予它们质量的希格斯粒子。让我们拭目以待。

---

① 参见“术语：场、量子以及其他”（第 59 页）。

② 在恰当的单位制中，能量（E）等于普朗克常数乘以频率（n），而动量（p）等于普朗克常数除以波长（l）。同时，对于无质量粒子，$E=pc$，$nl=c$。我希望这些能对你有所帮助，因为方程看起来比文字清楚得多。若无帮助，你也不用纠结于此。

7.4 中微子矩阵

QCD 和弱相互作用理论的一个怪异之处在于，它们是非阿贝尔（non-Abelian）理论。[①]这意味着，位于作用力核心的对称性[②]所遵从的代数不对易，即 A 乘以 B 不等于 B 乘以 A。

作为一种常识，或者拿出计算器算一下，你就能发现，对于两个数 A 和 B，将 A 乘以 B 的结果和将 B 乘以 A 的结果一样。两份的三个一元硬币等于六块钱，三份的两个一元硬币也等于六块钱。事实上，对于数字而言，这总是成立的。不过，我们完全可以定义某些数，满足 AB 不等于 BA。而数学家很早以前就已经研究这种数了。

然而真正令人惊讶的是，物理学家也一直使用着这些数，因为有一些物理量不满足 AB 等于 BA。表示这些物理量的一种方法是使用矩阵（matrix）。最近我在 UCL 开的一门一年级本科生课程中，就有矩阵力学的内容。我实际上在 15 岁的时候就学了一些矩阵，因为当时我的中学正在实验性地推广“新数学”教学大纲。

在数学中，矩阵就是排成行和列的一些数。将两个矩阵 A 和 B 相乘得到另一个矩阵 C，实际上就是将行和列相乘。[③]

这种矩阵听起来没有像充满子弹时间和黑西装的电影里的虚拟现实超级计算机（同样名为 Matrix）那样迷人，但它更实用。

例如，你可以用矩阵描述物体的移动，因为在此处，结果受操作顺序（AB 或 BA）的影响。先转 90 度再走 10 米和先走 10 米再转 90

---

① 以挪威数学家尼尔斯·亨里克·阿贝尔（Niels Henrik Abel）命名。虽然与《圣经》里的亚伯同名，不过据我所知，他没有被他的兄弟谋杀。

② 参见“术语：规范理论”（第 98 页）。

③ 具体说就是，将 A 的第一行和 B 的第一列相乘，就得到 C 相应位置（第一行第一列）的值。将 A 的第一行和 B 的第二列相乘得到 C 相应位置（第一行第二列）的值，依此类推。

度所到之处显然不同。如果 B 是代表转弯的矩阵，A 代表步行，则两者结合的“步行再转弯”矩阵（C=AB）必然和“转弯再步行”矩阵（记为 D=BA）不同。所以 C 不等于 D，AB 不等于 BA。如果 AB 永远等于 BA，矩阵就无法描述此类操作了。正是因为不对易（即非阿贝尔），它们才有用。

当保罗·狄拉克研究高速运动的电子满足的量子力学时，他发现矩阵正是他所需要的东西。事实上，让他不得不使用矩阵描述的物理特性就是电子的自旋，而自旋对原子的行为和元素周期表的排列至关重要。他同样因此预言了反物质的存在。

数学和现实世界的联系如此紧密，令我很惊讶。好研究既意味着提出好问题，也意味着解答问题。而问题总是比答案多，研究又总是费钱费时，所以我们需要作出选择。一个很好的选择方法就是利用数学分析实验数据，辨别哪个新实验最有趣，而不管方法或结果（例如矩阵和反物质）看起来多么不合常理。

基于这种精神，在我们继续希格斯粒子的搜寻之前，开个小差最后讲讲中微子，这次是一个真实而重要的结果。在 2012 年 3 月 7 日，中国的大亚湾核反应堆中微子实验公布了一些新结果。[①]这些结果对标准模型以及未来的粒子物理有巨大影响。如果你只关心希格斯粒子的故事，大可以跳过这一节，我们下节再会。而中微子粉丝们，请继续。

中微子之间可以相互混合[②]，而这种混合实际上是中微子的一组标记（味——电子、μ 子或 τ 子）和另一组标记（质量）之间的转动。这种转动也可以用矩阵描述，其中包含三个混合角。

一个非常重要的未解之谜是，三种中微子究竟是以三种不同方式

① 参见：http://arxiv.org/abs/1203.1669.
② 参见 5.5 节“与此同时，在中微子领域”。

混合，还是仅仅以两组不相关的方式两两混合？三个混合角中已经有两个得到测量，但还有一个仍然未知。[1]它就是 θ_{13}（读作西塔一三）。

大亚湾得到了 θ_{13} 第一个清晰的测量结果[2]，表明它确实不为零——事实上，它约为 9 度。很快，韩国 RENO 实验（Reactor Experiment for Neutrino Oscillations，中微子振荡核反应堆实验）一个相似的测量[3]也支持了这个结果。由于 θ_{13} 是粒子物理标准模型的一个基本参量，所以这无疑是一个非常重要的测量结果。但它的重要之处还不止于此。

如果 θ_{13} 为零，我们将只有两种方式的中微子混合。味量子态可能只会混合中微子 1 和 2，以及中微子 2 和 3。而若 θ_{13} 大于零，中微子 1 也能和中微子 3 混合。在这种情况下，也**只有**在这种情况下，矩阵中允许存在第四个参数。我们尚未测量这第四个参数（δ，读作德尔塔），但现在知道它确实存在。最重要的是，如果它存在，而且同样不等于零，它就会在物质和反物质之间引入不对称。

这很重要，因为目前我们还不知道，为什么在宇宙中物质远远多于反物质。我们也不知道为什么存在三代中微子（而且不仅中微子，每一类基本粒子都如此——三代带电轻子、三代电荷为−1/3 的夸克和三代电荷为 2/3 的夸克）。但我们知道，三代是允许物质和反物质在弱力中表现有所不同的最小代数。这个结果就如同物理学家脑海中蜂鸣的警报：**新物理就在此地某处！**它强烈暗示着，这两个尚未被理解的事实会在另一个更大、更完善的理论中联系在一起。

我们已经测量了夸克中物质–反物质的差别，而非零的 θ_{13} 意味着中微子之间也存在差别。更多的线索。

---

① 虽然 MINOS 和 T2K 远距离实验以及法国的双舒兹反应堆实验（Double Chooz Reactor Experiment）都有一些迹象表明它不为零。

② 参见：http://arxiv.org/abs/1203.1669.

③ 参见：http://arxiv.org/abs/1204.0626.

因此，我们不仅见证了反物质光谱学的开端（我们将利用它验证电磁力中确实不存在物质–反物质不对称），现在在同一周，我们又看到了中微子的结果。它表明，通过中微子寻找弱力中物质–反物质不对称的研究，诸如日本的 T2K 和美国的 NOvA 实验，并没有白白浪费时间。

中国和韩国的科学家很早以前就参与到了主要的粒子物理实验中，但此次是他们在本土做出的最重要的两个粒子物理结果。以前，若要将实验结果从一个大陆传播到另一个大陆，需要花费相当长时间，但现在情况不一样了。和大多数物理学家一样（可惜，CERN 的 ALPHA 反氢实验并非如此），大亚湾科学家将结果投递到了 arXiv。对粒子物理学和天文学而言，这是延续多年的标准做法，甚至能追溯到万维网发明之前。我在攻读博士学位时，万维网还没有发明（它要稍晚一点），但我们已经有网络。当赫尔比・德赖纳和我完成了可谓我的人生首篇学术论文[①]时，他将论文加入了美国洛斯阿拉莫斯国家实验室管理的“公告栏”。之后论文通过电子邮件传递给了全球订阅了公告栏的粒子物理学家。

对我而言，这些都是新天地。理论物理学家总是超前于实验物理学家，但实验物理学家很快就会赶上。当万维网兴起时，这些东西都搬到了网上，造就了现在的 arXiv。它由康奈尔大学图书馆负责管理，由国际研究机构合作资助，供免费投稿免费下载。我的第一篇论文仍在那里。arXiv 保存了论文的全部文字和插图。[②]基本上，所有粒子物

① 参见 3.5 节“超对称”。

② 如果你看了我们的那篇论文（http://arxiv.org/abs/hep-ph/9211204），你或许会注意到我们并没有将插图加入论文。这是因为，我当时还无法很好掌握如何在 LaTeX 中插入 PostScript 格式图片。而如果你在 INSPIRE-HEP 网站上查找该论文，你将会发现 KEK 甚至全文扫描了带插图的论文。我们曾经给过它们论文。啊，那些难忘的岁月……

理学、天体物理学和天文学的论文都在那里，不管它们是否也发表在杂志上。arXiv 也覆盖了凝聚态物理学、核物理学、数学、生物学等领域，虽然我不清楚有多少比例的论文上传到了上面。

为了解释 arXiv 为什么非常重要，让我以我的第一篇论文做例子，它发表在一份名为《核物理 B》（*Nuclear Physics B*）的期刊上。上一次我看的时候，你仍然可以从期刊网站下载论文，不过需要花费 31.50 美元。在这之中，赫尔比和我将收到……零美元。不幸的是，获得 ALPHA 实验结果的方法似乎只能是老老实实地支付英国自然出版集团 32 美元，虽然你的税收可能已经为实验作出了相当的贡献。昂贵的价格（无论是在发表论文的时候还是在你想要阅读论文的时候）将实验结果限制在了少数经费充足的研究机构和个人中。它剥夺了其他地方科学家的机会，因此也让科学界无法受益于其他科学家的技能。现在，研究结果开放存取（open access）的呼声越来越高，而我们也已经决定，任何有关希格斯粒子的确定结果都可以免费获取，即使这将导致我们无法在一些声望卓著的期刊上发表论文。

7.5　大自然真的自然吗？

我的大部分工作是测量 LHC 中质子–质子对撞时发生的事情。但就在 2012 年 LHC 刚开始运行时，我参加了一个会议，关于还未发生的事情——而且直到目前也还未发生。会议在美国马里兰大学举办，题目是“超对称、奇异粒子以及面对希格斯粒子的对应策略”（Supersymmetry, Exotics and Reaction to Confronting the Higgs），缩写为 SEARCH——上乘的缩略语（第一种类型），无可置疑。

正如之前讨论过的，在 LHC 能够涉及的能量领域，出现了一些特

殊的物理现象。[①]电弱对称性破缺开始产生，W 和 Z 玻色子在此能量区域拥有质量。正是此事让我们相信，如果标准模型希格斯玻色子存在，它最终一定会被 LHC 发现。

另一个更普遍但相对较弱的基于“自然性”（naturalness）的论点常被用来证明其他新物理同样也会被 LHC 发现。在此处，自然性代表着一种假设：理论中各种参量的大小应该差不多。比如两个参量的比率应该介于 0.1 到 10 之间，而且这些比率不必通过不可思议的精细调节就能让理论工作。

不幸的是，在标准模型中，似乎希格斯粒子的质量必须经过不可思议的精细调节。超对称或许能够解决这个问题，然而在那之前，我们应该先看到一些 SUSY 粒子存在的线索。但实际上并没有。许多物理学家对超对称的缺席备感困惑。更困惑的是，在 LHC 的数据中，任何能够解决精细调节问题的新粒子都没有出现。虽然抛弃自然性的观点还为时尚早，但事情也已经发展到了一定程度，以至于在 SEARCH 会议结束之时，好几个知名理论物理学家开始建议人们将研究重心放在理解 QCD 上。部分是因为 QCD 本身很有趣，但主要还是因为，如果我们能够更好地理解 QCD，我们就能更有效地寻找藏匿于 LHC 数据中的新物理。

当然，这是我们早就已经开始做的事情。例如，最近 ATLAS 公布了喷注次级结构一些新变量的首次测量结果，这些结果对寻找新粒子很有帮助。ATLAS 这篇新论文的结论是，我们确实很好地理解了 QCD（和我们的实验），足以令我们正确使用这些变量。其中一些想法甚至已经在 CMS 的希格斯粒子搜寻中使用过。我对这些结果信手拈来，是因为我亲自进行了此方面的研究（它们是定期“提速”会议

① 参见 5.9 节“谁主沉浮，理论还是实验？”。

的主题）。然而，在能够完全理解 LHC 想要告诉我们的事情之前，还需要进行更多相似的精确测量和计算。如果最终我们还是没有发现超对称或其他相似的东西，自然性的观点就真的有麻烦了。

有一次我去美国参加物理会议，在华盛顿杜勒斯国际机场被堵在了入境队伍后面。入境处大约有 30 个窗口，但只有一个开放，而且那个窗口的工作人员将所有时间都花在了一个家庭上。我估计，因为那个妇女带着面纱，而她的丈夫又留着满满的络腮胡子，才让他们滞留在了入境窗口。最终，其他工作人员大概感到有些尴尬，所以让我们使用了只允许美国公民的入境窗口。这是我在美国移民局遇到的第二糟糕的经历。第一糟糕的经历发生在 1995 年 12 月我第一次去美国时，当时我准备去宾夕法尼亚州立大学。那次旅途的整个过程都是在和我的签证纠缠，而且差一点无法入境。

我曾经接受过宾州州立大学的一个职位。对它的地理位置，我只有一个很模糊的概念，不过这无所谓，因为宾州州立是世界一流大学，而且它愿意支付我在德国汉堡的生活、继续 ZEUS 实验的工作，而这正是我想要的。

为了申请签证（J-1 签证，允许我在美国研究机构工作，获取报酬），我需要去一趟宾夕法尼亚，虽然不用待多长时间。我预备在博士学位口头答辩结束后几天飞往美国。由于不敢保证事事顺利，所以我没有提前预定机票，但随时都可以启程。我的答辩时间在周四，如果顺利通过的话，我将在周末飞往美国。

不幸的是，在那之前的周六，我的行李箱被偷了。行李箱中有一些全新的玛莎百货内裤、我自己织的长围巾和护照，护照中有 J-1 签证。

内裤可以再买，围巾就无能为力了（我已经忘了怎么织）。签证和护照可以再办，不过会很麻烦，而且需要尽快拿到。

那一周的前半部分几乎都在火车上度过，先是去曼彻斯特（父母和出生证明），之后去利物浦（护照局）。之后又匆匆赶回牛津大学参加答辩。往好处想，我连紧张的时间都被占据了。最终我通过了答辩，虽然每当想起回答错了的一些问题时，我仍然会冒冷汗。我的一个博士生同学里克·盖茨克尔（Rick Gaitskell）随后开车送我去伦敦。挚友，再开辆车，简直完美！现在里克是美国布朗大学的教授，研究暗物质。我希望他现在有一辆更好的车了。

我冲向格罗夫纳广场，不过在美国大使馆吃了闭门羹，因为我随身带了旅行包。禁止箱包入内！怎么办？最后我想起了我是英国物理学会的会员，相信那些好人会为我保管旅行包。很快又回到格罗夫纳广场。签证解决！找旅行社！机票解决！抓紧抓紧！

在地铁上，我看了眼机票，发现目的地是纽瓦克。这到底是什么鬼地方！我让旅行社给我预定去纽约的机票，他们肯定听错了！就我所知，纽瓦克可能在美国西海岸！

最终我让自己冷静了下来。我不记得当时是在地铁上随便找了个人，还是在航班的登机口询问纽瓦克是不是在纽约附近，总之所幸得到了肯定答案。我已经记不得那次航班了，但还记得，当见到来接机的新老板吉姆·惠特莫尔（Jim Whitmore）时，我几乎已经魂不守舍了。

之后我们在暴风雪中驾车从新泽西州纽瓦克前往宾夕法尼亚的大学城，它位于宾州的几何中心（也就是说，穷乡僻壤）。在途中，车子至少有一次滑出了公路（“真该开辆皮卡来。”吉姆满不在乎地说），所幸最终还是安全到达了一个汽车旅馆，我已经茫然了。我记得当时被旅馆房间中的抽水马桶大小吓到了，总担心会掉进去。晚上睡觉途中醒来，有一种不知身在何处的感觉。

在电影《十全十美》中有一个场景，醉醺醺的达德利·摩尔（Dudley

Moore）在加利福尼亚跟上了波·德瑞克（Bo Derek），结果醒来时发现自己身处墨西哥。他惊讶地四处张望，被一阵西班牙吉他的声音引到了阳台。我现在的情况也差不多，只不过迎接我的不是一阵乱弹琴，而是暴雪中的美国小镇冬季仙境。

我像电影《生活多美好》中的詹姆斯·斯图尔特（James Stewart）一样跌跌撞撞地走在积雪的街道上（美国处处都是电影场景），最后停在了一个看起来最像是酒吧的地方。在酒吧中喝了点啤酒，看了会电视中的游戏节目，我开始恢复一些状态，直到和我时不时说着话的酒吧服务生靠近我对我说：

“我看你不是同志吧？”

“当然不是。为什么这么问？”

“每当到了晚上这个时候，这个酒吧就会变成同性恋酒吧。你继续待着可能会觉得不舒服。”

“哦，哦，对对。谢谢提醒！”

“其实我马上就下班了。你想和我一起去另一个酒吧玩几把台球吗？”

这到底搞得什么鬼！不过我还是跟他去了。所幸他要么是直男，要么就是对我没兴趣。我们又碰到了一群学生，我把他们都打败了。粒子物理和这种弹球游戏之间的紧密联系我之前已经说过了，但鲜为人知的是，实际上粒子物理学家都很擅长美式台球和斯诺克。

第二天，我在电梯中遇到了粒子物理巨匠约翰·柯林斯（John Collins）。他的成名作包括证明了在某个重要意义上夸克和胶子都是真实的。

质子由夸克和胶子构成。我们主要通过它们和电子的散射研究它们在质子内部的分布情况——德国汉堡我所在的实验当时做的就是这事。柯林斯（和其他两个同事）证明了其中的“因子化”（factorised）

性质。

夸克和胶子在质子中的分布方式非常难计算，甚至不可能。但因子化理论指出，如果你在一类对撞中测量了它，结果可以用于其他对撞中，即你可以用我们实验中获得的知识预测其他质子实验中发生的事。我们在实验中（例如预测 LHC 中质子对撞的结果）运用了这个假设，所以能够证明它的正确性是非常重要的工作。

至于他台球水平怎么样，我还不知道。当时我有些羞涩。我记得当时对他说了句："哈啰。"但也有可能是："请问人力资源办公室在哪里？"

我当时太魂不守舍了，以至于一天之后才意识到，当我用"商务"回答工作人员关于我三天访问的目的时，他没有给我签发 J-1 签证。而这正是我此行的唯一目的，我还靠它在美国工作呢。工作人员在我刚补办的焕然一新的护照上盖上了 B-1 访客的签证。

所幸后来人力资源部妥善解决了我的 J-1 签证缺失问题。LHC 能否妥善解决超对称缺失问题还需日后观察。事实上，在目前阶段，希格斯玻色子也仍然缺失。

7.6 对一些人而言很有趣，但也很危险

LHC 运行顺利，数据也以相当快的速率积累，我们投入于四轻子和双光子的质量分布研究中，看去年的线索是被验证还是像迷雾一样消失在新统计数据中。

5 月有个合作组会议，会议中展示了 2012 年实验数据所得双光子分布的首次更新结果，这些结果只限内部使用。我并没有直接参与其中的分析工作，因此在它新鲜出炉后我才有所了解。之前谣言一直在合作组内部流传，但一天一个样，所以很难从中推测事情进展。我记

得当时坐在听众席中，焦急等待着关键图表的展示。出于一些原因，我没有看到前面的演示幻灯片。而这些幻灯片或许还没有上传到会议主页。

去年12月，基于CMS和我们的线索，我开始相信希格斯粒子存在的胜算要大于一半。对于我这样的希格斯粒子怀疑论者，这算很大的一步改变。现在，在看到2012年的首个质量分布图后，我的第六感告诉我，这就是结论。虽然数据仍然需要复查，而且尚未达到能够确信的显著性，但其中出现了一个小突起，恰好在去年12月结果所在的位置！这让结果更可信。虽然出于科学的态度，实际上也不能确信，但我心中的天平已经有了倾斜。

对科学家而言，这是非常危险的阶段。

下一次实时希格斯粒子搜寻结果的更新预计在7月4日公布。数据仍然不断涌出，相互校对工作也仍在进行。我们陷入了一种奇怪的状态：急切地想要知道结果，又不愿看到任何剧透和来自CMS的看似可靠的谣言。当然，谣言还是在一段时间内广泛传播着，甚至在推特上还短暂出现了“希格斯粒子谣言”的热门标签。对中立者而言，这一切都很有趣。而且我也很高兴发现，还有其他人对我们的实验感兴趣，因实验结果而激动。

但……说到CMS的数据，我真的很不想提前知道。

设计两个相互独立实验的目的之一是让它们相互验证——独立地。只有在没有对方实验数据干扰的情况下，相互验证才最有效。事实上，在一定程度上我们甚至尝试忽视自己的数据：在得到关键数据之前尽量决定和优化大多数分析。这甚至排除了潜意识主观偏差对研究的影响。如果你存在主观偏差，虽然最终还是有可能得到正确结论，但你所做出的置信度和显著性统计估算都会出错。如果第六感告诉你已经有了结论，你更需要谨慎。第六感可能出错。

所以最好的情况，CMS 的谣言是一些不准确的噪音，听到它们会分散我们的注意力；最坏的情况，它们是准确的，而我们的分析由此会被干扰。相似地，泄漏我们自己的 ATLAS 数据不仅是对合作组内部信任的背叛和破坏，还会干扰 CMS。

ZEUS 实验曾经发生过一件事。有一次，我们在能够达到的最高能量上得到了比预期稍多一些的对撞事例。当时那个能量完全是未知领域，在我们之前，没有其他人研究过更高能量的物理。所以它有可能代表着一些全新的、激动人心的东西。就在我们忙于此事、公布结果之前，有一个谣言开始到处传播。谣言说，HERA 环上的另一个实验 H1 在高能区域也发现了一些古怪的东西。他们也听到了关于我们数据的谣言。谣言增长了彼此的信心，因此许多人喜形于色。可惜这是个假信号。当数据都公布之后，结论就很清楚了。虽然我们都发现了反常的结果，但都不显著。更糟的是，它们还不一样。所以不仅没有强化，还抵消了彼此的结果。

这没有造成什么严重后果，虽然引来了大量试图解释结果的理论论文，但这种灌水论文比比皆是，也不多这几篇。我因此接受了《午后一点全球资讯》（*The World at One*）新闻栏目主持人尼克·克拉克（Nick Clarke）的采访。节目非常精彩，他是一位才华横溢的主持人。那是我的第一次（也是很长一段时间中唯一一次）BBC 电台第四台经历。但对研究工作而言，时间被浪费了，而且如果我们没有继续收集更多数据澄清事实，那个结果或许到现在还会困扰我们。在 LHC 实验中，我们不想让此类事情发生在希格斯粒子上。我们想要确切的答案，干扰越少越好，时间越快越好。我很欢迎科学的开放性，最终它对科学至关重要。但那只是“最终”，而非在实验进行当中。期间，我们真的不想知道其他结果。

CERN 研讨会被安排在国际高能物理大会（ICHEP）最开始时。

ICHEP 每两年举办一次。在 2008 年美国费城的会议上，LHC 刚准备第一次启动，Tevatron 刚排除它们希格斯粒子的第一个可能质量点。两年后在法国巴黎的会议上，LHC 展示了第一批数据，引发了严重的希格斯臆想症。2012 年的会议在澳大利亚墨尔本举行。这不会是最后一次，但我们都知道，它终将成为我们迈出的巨大一步。

我们都想知道，这一步到底有多巨大。

第八章

发现

（2012 年 7 月）

8.1　宣布

时间是 2012 年 7 月 3 日，地点是居里报告厅，它是 CERN 第 40 号楼下面的一个会议室。那里共有四个会议室（安德森、玻尔、居里、狄拉克），而标准模型小组的每周组会通常在居里报告厅举行。那天早上，ATLAS 的发言人（即老大）法比奥拉 · 贾诺蒂将在组会上排练次日早上的公开报告。报告的标题体现了科学客观性："ATLAS 上标准模型希格斯粒子搜寻工作的现状"。报告将在次日早上通过网络面向全球直播，当然特别面向刚好在墨尔本开幕的国际高能物理大会（ICHEP）。

人们（先是我们，慢慢扩展到大众媒体）越来越清晰地觉察到，这将是一个不同寻常的大会报告。彼得 · 希格斯被目击现身小镇（和涉身于希格斯粒子搜寻工作的爱丁堡同事们共进午餐），而弗朗索瓦 · 恩格勒特也将出现于周三报告的观众席中。当法比奥拉开始试讲时，紧张氛围弥漫着全场。几乎没有人看到过所有整合在一起的

ATLAS 结果，而其中一些结果甚至刚在几个小时之前得到。我们都知道我们得到了一些特殊的东西，但它们将如何整合呢？而且，法比奥拉仍会坚持 Comic Sans 字体吗？

后一个问题马上就有了解答。ATLAS 和 CMS 之间没有多少直接合作，看起来也没有人告诉法比奥拉应该如何准备幻灯片。仍是 Comic Sans 字体！当然，最重要的还是内容，不过演示方法也会产生不同效果。正如帕特里克·金斯利（Patrick Kingsley）在《卫报》中指出的：

> Comic Sans 字体或许已经被过度使用。它看起来很幼稚，而且似乎是仓促设计的字体。但它也很易读，而且实验表明，它可以让复杂的信息更易于理解。所以它经常被读写障碍症辅导员采用，因为它能帮助阅读。

所以或许对于尽量平易近人地传达费解的新实验结果而言，Comic Sans 字体也不失为一种选择。

实验数据将如何整合的问题在随后一个小时中得到了解答。截至两个星期前，2012 年的机器运行总共递送了 6.6 每飞靶数据。记录到的数据相当于叠成 5000 米高的 CD 光盘，而其中超过 90% 的数据已经得到了分析，它们将和去年的数据一起出现在结果中。许多重要的标准模型过程已经被测量得非常精确，这也从侧面反映出我们已经很了解涉及到的探测器和物理。

最关键的结果是双光子质量分布图和四轻子质量分布图中凸起的寻找，而法比奥拉在展示结果前花了一些时间讨论其中光子识别的各种细节。2011 年的数据给出了 3.5 个 σ 的显著性，而今年的新数据给出了 3.4 个 σ，所以两者整合给出 4.5 个 σ。已经算是强有力的证据，但还没有超过按照惯例可以称为发现的五个 σ 阈值。

但还有其他结果。随后法比奥拉简单讨论了电子和 μ 子的重建工

作，展示了四轻子分布结果，其中也有一个凸起。2011 年它有 2.3 个 σ 的显著性，而新数据给出了 2.7 个 σ，整合结果 3.4 个 σ。又一个强有力的证据，可惜仍非五个 σ。但将这些结果都整合在一起，再加上 2011 年数据中 WW 和其他衰变道的结果（2012 年更新的结果尚未完成分析），神奇的数字终于出现了：五个 σ!

这是个随意的阈值，仅仅是种惯例，没有什么特殊的物理含义。但我们早就设定了这个阈值——即使我们再谨慎，也没必要将球门柱往后移，不用等到球进了后面的灌木丛才百分百确信。所以我们有了发现!

这是永生难忘的经历。法比奥拉展示数据和结论的场景深深印在了我的心中。我提前看过部分幻灯片，也了解一些结论背后的文档和分析。这是数以百计的同事齐心合力的结果，而在此具体分析中，很多人比我付出了更多努力。这些结果背后是我们长年累月的辛勤劳动。但即使知道待公布的结果是什么，能亲眼目睹法比奥拉向我们所有人宣布这些结果也是非常激动人心之事。

在组会最后，我们决定不再称这个结果为“超额现象”，而改称它为一个新玻色子。

那一天剩下的时间，我都待在梅兰的一个土耳其烤肉店里（附带台球桌），亦即我在引言部分将你带进本书的地方，和《第四台新闻》栏目的记者对话。之后我去了机场，搭乘我半规律的 20:05 分航班前往伦敦城市机场。次日法比奥拉向全世界宣布结果时，我既不在日内瓦，也不在墨尔本，而在伦敦西敏区观看网络直播，一起的还有众多英国粒子物理学家、记者、大学及科学事务国务大臣戴维 · 威利茨（David Willetts）以及英国科学界的其他许多人士。

7 月 4 日早上，我们很早就到了转播会场。在乔 · 因坎代拉（CMS 的发言人）和法比奥拉的报告之前，CMS 的吉姆 · 维尔德（Jim Virdee）

和我将接受 BBC 电台第四台《今日》栏目的采访。当时我仍不知道CMS 的最终结果。CERN 的总干事罗尔夫·霍伊尔知道 ATLAS 和 CMS 的结果。他的情绪如何：激动？放松？焦虑？担忧？实际上，他看起来和往常一样完全不可捉摸。吉姆和我迫不及待地向对方展示了自己的实验，让我们得以对最终结果有所预期。CMS 首先展示了他们的结果（去年 12 月我们占先），如果整合光子和轻子衰变道的数据，就达到了五个 σ。我很庆幸先和吉姆交流了一会儿，因为当乔开始报告时，我根本没有时间仔细听他到底讲了什么，我的周围到处都是想要和物理学家探听结果的人。这次报告的目标群体是科学家而非媒体或大众，这让我很满意。不过这也意味着，他们的话需要经过翻译才能被其他人听懂。

当然，有一个地方大家都听懂了。我中断采访开始鼓掌，周围也迸发出雷鸣般的掌声：法比奥拉宣布了我们五个 σ 的结果。随后就是情感大戏，彼得·希格斯和弗朗索瓦·恩格勒特首次在现实中相会，而罗尔夫·霍伊尔发表了著名的声明："作为一个门外汉，我现在想说——我认为我们成功了，你赞同吗？"

我们赞同！

在所有谣言和线索之后，在所有规划设计和因为所以之后，我们终于解开了种种合理质疑，发现了本质上新的东西！

我们无法排除在 LHC 上出现任何东西的可能性，因为从来没有人做过相似的实验。但如果希格斯玻色子不出现，就意味着我们对基础物理（以标准模型描述）的理解不完整，更直白地说，我们的理解有错误。

上述结论的推理过程令人惊叹。我们知道，质量起源发生在 LHC 能量区域。我们知道此事，是因为两种基本作用力（电磁力和弱力）在此能量区域统一。这两种力在日常（低能）生活中之所以不一样，

是因为传递弱力的 W 和 Z 粒子有质量，而光子没有质量。在标准模型中我们只能推断，W 和 Z 玻色子的质量之所以出现，是因为某种量子场充盈全宇宙，它和粒子相互作用赋予粒子质量。这是认识上的一次大飞跃，基于某些相当深奥的数学知识。唯一能够证明此认识是否正确、此量子场是否真实存在的方法是在场中制造一种波，或者说一种激发态。这个波就是（或将是）希格斯玻色子。它必须在 LHC 中出现，否则说明量子场不存在，或者性质和我们预期的完全不同。除此之外，别无选择。

因为相信数学的正确性而创造了充盈全宇宙的场，这听起来相当荒诞。但事实似乎就是如此。2012 年 7 月 4 日，我们确认发现了一些本质上新的东西，它们符合所预测粒子的描述。这些预测来自对之前实验数据的数学理解，再加上我们对美、对称性以及和谐统一的优雅宇宙的偏爱。我不清楚你的感受，但这确实已经让我叹为观止。

在西敏区会场的活动结束之时，伦敦科学博物馆的艾莉森・玻意尔（Alison Boyle）邀请约翰・沃默斯利（负责资助全英的粒子物理研究的 STFC 的行政总裁）、吉姆・维尔德（前 CMS 发言人）和我在一份“留给子孙后代”的新闻稿上签名。如果伯明翰大学的戴维・查尔顿（David Charlton）能够代表 ATLAS 签字就更好了，因为他当时是法比奥拉的副手（之后成为 ATLAS 老大）。不过那时他正在墨尔本。而且话说回来，这是团队努力的结果……

8.2　洋葱之外：LHC 计算网格

我之前提到过用以分析得到这些结果的海量数据。那些数据通过围绕着对撞点的各层不同技术（追踪探测器、热量计、μ 子系统）加以采集，再通过“触发器”（高速联网电子器件和计算设备，以确保我

们记录到的数据包含大部分有趣的对撞事例）预筛选。随后它们经过重建，重建过程在之前已有详细描述。[①]这是确定究竟生成了何种粒子的第一步，而最终它们将成为法比奥拉展示的结果。

完成这些事情的计算机资源不曾存在于 CERN，而且现在依然没有。全世界约 35 个国家和地区超过 140 个计算中心组成了全球计算网格[②]，通过高速网络互联，为所有 LHC 实验以及全球其他科研项目服务。数据传输速率通常超过 10G（相当于两张 DVD 光盘容量）每秒。在不处理 LHC 数据的时候，计算网格也在运行模拟程序。模拟数据对理解真实数据也至关重要。

计算网格上数据处理和流动的实时联网监控画面总能让人对 LHC 项目的全球规模产生敬畏甚至恐惧的感觉：海量数据从日内瓦流向北美、中国台湾、北欧、印度等地方，停留在无数物理学家的笔记本电脑中，最终转变为揭示真实宇宙最基本奥秘的新信息。

8.3 无须三思，已得真知

7 月 4 日，西敏区会场的物理学家和众多记者进行了问答。在众多提问中，有两个反复出现的主题，至今想起来仍令我一笑。而在不断扩大的有关 CERN 和 LHC 的报道中，它们仍然盛行不衰。

在经过前几年的刻意回避、谨言慎行、只谈论线索和概率之后，我们现在终于有底气说，我们确实有了发现。对我们而言，这是重大突破。我之前说过，即使在法比奥拉的预演组会报告中，我们的用语仍然很谨慎，用了诸如“超额现象”的说法。而只有在最后，我们才

---

① 参见 5.1 节“为什么‘凸起’意味着玻色子？”。

② 英国的主计算中心（我们称之为 Tier 1 中心）位于牛津郡哈韦尔的卢瑟福–阿普尔顿实验室。

一致决定称它“新玻色子”。这听起来已经很了不起了，但对于一些媒体而言，这似乎还不够。我们可以说新玻色子看起来像希格斯玻色子或像某种希格斯玻色子，但不会说“我们得到了希格斯玻色子”。在下一节我会向你解释究竟在何种条件下我们才会说出这句话。但从目前这些对话中，我清晰地感受到，在 LHC 的科研人员和记者之间存在鸿沟。对我而言，说出“我们确实发现了一种新玻色子”已经是我有生以来最激动的事情（至少在职业生涯中）。如果最终发现它是希格斯玻色子，当然锦上添花，但如果最终发现它是其他东西，从某些方面来说，这是更加令人激动的事情。而目前我们是否知道这点和我们的激动情绪毫无关系。真正重要的是，当前结果并非数学上的统计波动或分析中的其他人为偏差，而是真实结果，代表了一种全新的东西。不过，要将这种情绪传达给那些期待听到“看，我们找到了上帝粒子”的人，还是有些棘手的，尤其在你过度激动、精疲力尽的时候。

瞧，我还是写出了“上帝粒子”这个词，虽然加了引号。这将我带到了第二个反复出现的主题。

那一天我参加的最后一场媒体活动是 BBC 国际频道的《你来说世界》（*World Have Your Say*）节目，在节目中讨论此发现的意涵。很不错的主题。他们确实提醒过我，“宗教意涵”也是讨论的一部分。但由于其中根本没有宗教意涵，所以我很单纯地认为可以在节目中几句话带过，而将一小时节目的大部分时间用于谈论真正发生的事情。

节目很有条理地开始了。在宝贵的前 15 分钟，我们回顾了刚刚发生的事情，对 CERN 和实验背后的技术进行了介绍。一切顺利。和我一同在演播室的是桑尼·威廉森（Sonny Williamson）。他是一个聪明又讨人喜欢的小伙子，职业作曲家。作为一个非物理学家、非专家的资深粉丝，他一整天都在忙于系列采访的事情。他之前甚至利用假期访问过 CERN。此外还有一个威尔士的印度教徒。电话连线的有英国

物理学会的凯特琳·沃森（Caitlin Watson）和科学作家马库斯·乔恩（Marcus Chown）。都不错。

在节目还剩40分钟的时候，马库斯离开了，代替他的是一个预料之外的宇宙学家安德鲁·贾菲（Andrew Jaffe）。而主持人提示我们应该讨论宗教意涵了。我开始有些担心。

桑尼说没有宗教意涵。凯特琳说没有宗教意涵。安德鲁和我也说没有宗教意涵，除非你信仰的宗教教导你无视我们的证据。但即使真的存在这种宗教，这世界上还有许多远比希格斯玻色子更值得他们关注的大问题，譬如地球的年龄。一般而言，我们的这个发现没有特殊的宗教意涵。

但这些讨论还不够。节目还连线了一位基督教牧师，他表明没有宗教意涵。那位印度教徒声称，他的宗教其实已经预言了此发现，这让在场的几个科学家暗笑不已。我们连线了一位犹太教拉比，她说没有宗教意涵。我们连线了一位伊斯兰教伊玛目，他也说没有宗教意涵。节目最后是一场枯燥乏味的讨论，关于宗教和科学如何各说各话。在某一时刻，主持人似乎开始不耐烦了，觉得我们这些科学家说得太“外交腔”，不能像理查德·道金斯（Richard Dawkins）一样激烈反宗教。而那些宗教人士又太理性了（除了那位或许算是例外的“量子”印度教徒）。在这个世界上存在着一些历史相当久远的宗教系统，但我还没有见过任何宗教在教义中拒绝承认非零真空期望值的标量场存在。而且确实，印度教徒、伊玛目、拉比和牧师似乎都表示赞同。

所以我浪费了几个世纪以来我们领域最伟大发现的晚上，与一群理性的宗教人士一起极力避免引发科学和宗教的战争。我并不是说平白虚度了时光，只是有些无趣。相较于这世界上本身就相互矛盾的种种宗教是否与大自然相矛盾的话题，我们还有许多有趣得多的东西可以讨论。

这让我想起了一次我参加过的《第四台新闻》栏目讨论。当时史蒂芬·霍金（Stephen Hawking）和伦纳德·蒙罗蒂诺（Leonard Mlodinow）出了一本新书，其中声称上帝已经没有必要存在。这看起来完全是一种似是而非的说法，而且据推测，它和利昂·莱德曼（Leon Lederman）发明的词语“上帝粒子”不相上下，似乎都是提高销量的噱头。[①]

我的看法是，如果你本来就能让进化论、天体物理学等东西和你的宗教世界观共存于心中，那么理论宇宙学估计也不会困扰你。而如果你本来就拒绝接受那些东西，那说明你的信仰早就已经结成一个茧将你与现实世界隔离，无论霍金怎么说都不会对你有影响。不过，至少在第四台讨论的那一天，也没有其他什么大事发生。仅仅是霍金出了一本新书，不是重大的科学突破，所以我们也不算浪费寸金寸光阴的时间。

最后说一下科学和宗教的关系。一段时间之后（2013 年 5 月），我去了布鲁姆斯伯里大剧院参加罗宾·英斯主持的理查德·费曼纪念会。费曼无论从哪个方面而言都是科学（尤其是物理学）的一个标志性人物。他和朝永振一郎、施温格一同获得 1965 年的诺贝尔物理学奖，获奖工作是量子电动力学（QED）的发现和形式化。而 QED 是第一个量子的、内部自洽的场论，它以极高的精确度描述了电磁力。费曼发明了费曼图描述 QED，这随后成为了粒子物理学界的基本方法，也在本书中频繁出现。他有孩子般的好奇心，能以一种独立而又不傲慢的方式谈论和教学。而且，他邦戈鼓也玩得很好。

粒子物理学家汤姆·怀恩特（Tom Whyntie）和天体物理学家安德鲁·彭岑（Andrew Pontzen）也参加了纪念会。和我一样，他们人手

① 我知道，莱德曼曾经声明他原来拟定的名字是《该死的粒子》（The Goddamn Particle），指责他的出版商擅自修改了书名。而我的出版商给这本书原先拟定的名字相当愚蠢，我成功地阻止了他们的企图。

一册《费曼物理学讲义》上台来。费曼讲义是我本科时寸步不离的读物，而且即使现在，每个准备学习物理的人也都应该读一读。不过，它的写作年代是 1960 年初（差不多是彼得·希格斯发表他著名论文的那段时间），所以虽然它包含了许多经受住后来时间检验的深刻直觉，却并没有涵盖全部物理学。希格斯玻色子的发现就是一例，而且还有大量新知识在讲义写成之后才被发现。

费曼对我们仍是一种激励，但他从来不是一位圣人。他当然也没有编码了全部物理学供我们学习，没有用一种神迹降世的方式解释物理。由于实验的不断发现，物理学继续发展，超越了费曼能够预见之处。我们站在科学巨人的肩膀之上，而他是巨人之一。正如本书最开篇所引马克斯·格卢克曼的话："科学是如此一门学科，在其中，即使是此辈之愚者亦能超越上辈之智者。"我们已经超越了费曼，但这不会减弱哪怕一点点他的伟大。他比大多数人都清楚，科学没有圣经，科学研究是一个不断进步的过程，是一件探究事物根底的乐事。

8.4 定冠词？

7 月宣布后我参加的第一个会议是"提速"年会，这一次由西班牙瓦伦西亚大学的马塞尔·沃斯（Marcel Vos）组织。持续很久的西班牙式午餐应该被更多会议采用。西班牙海鲜饭和红酒对讨论问题很有帮助，而且我很惊讶地发现，在这里听下午场的报告都不会像往常那样容易打瞌睡了。

新玻色子的发现让今年的会议比往年更令人激动。我们专注考虑的一个问题正是 7 月 4 日许多记者反复追问的一个问题。我们确信发现了某些东西，但坚持称呼它为一个"类希格斯"玻色子。什么情况下我们才会去掉前缀"类"呢？为什么不直截了当地说我们找到了"希

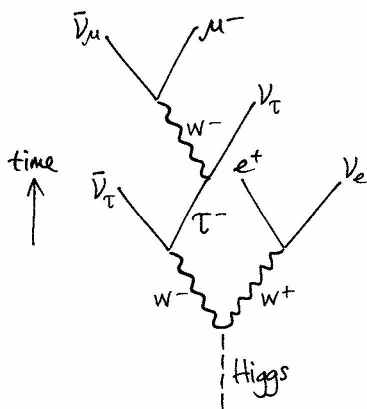
格斯玻色子”呢？

可以确信，新玻色子和标准模型希格斯玻色子共有的一个性质是它衰变得非常迅速。迅速衰变的粒子通常拥有好几种衰变选项，而它会任意“选择”其中一种。对于标准模型希格斯玻色子而言，每种选项都有某个概率权重，而概率可以由标准模型定义的相关费曼图精确预测。

这是量子物理中的常识：虽然概率可以预测，但单个事例的行为不可预测。放射性核子的衰变行为也有这种情况。我们可以测量“半衰期”。以不稳定的碳-11 同位素①为例，它的半衰期是 20 分钟。这意味着，如果某个时刻我们有大量碳-11 原子，20 分钟后其中大约一半将衰变。如果是少量碳-11 原子，其中一半衰变所需要的时间将出现明显的统计不确定性。但半衰期仍然是最可靠的估计。如果原子数量很多，半衰期就是非常精确的预测。然而没有什么物理学原理可以告诉你某个原子何时会衰变。它可能马上就衰变，也可能几年之后才衰变。你唯一能够知道的是，它在两倍半衰期时衰变的概率是 1/2×1/2=1/4，在三倍半衰期时衰变的概率是 1/2×1/2×1/2=1/8……依此类推。但这仅仅是概率，不是预测的精确衰变时间。

所以随着我们生成越来越多希格斯玻色子并观察它们的衰变行为，我们可以对每种衰变模式的概率进行越来越精确的测量。测量结果被称为“分支比”（branching ratio）。试想一个希格斯玻色子衰变的费曼图，它的结构和一棵树相似，希格斯粒子是主干，长着一些衰变产物枝干。

① 参见 7.3 节“波”。



一个希格斯玻色子衰变的例子

分支比能够告诉我们许多有关衰变粒子的信息。正如我提到过的，如果是标准模型希格斯玻色子，它的衰变分支比已经被精确预测（至少在知道新玻色子质量的前提下）。现在，从双光子和四轻子质量分布图的凸起中我们已经知道，这个质量约是 125 GeV。因此，要想知道新玻色子是否就是标准模型希格斯玻色子，测量它的分支比不失为一种好方法：测量到的分支比和理论预测吻合吗？

然而，分支比的测量还有更广泛的意义。分别衰变到玻色子或费米子的分支比尤其重要。在标准模型中，希格斯粒子赋予玻色子和费米子质量，但两者机制很不一样。费米子质量来自遍布全宇宙的新标量场——布劳特–恩格勒特–希格斯（BEH）场。通过和 BEH 场的耦合，费米子获得能量，表现为描述它们行为的方程中的质量。

而规范玻色子和希格斯粒子之间的关系更密切。通过赋予 W 和 Z 玻色子质量而保持光子无质量，希格斯粒子破坏了弱力和电磁力之间的对称性。在此过程中，粒子自旋发生了一些微妙的变化。

W 和 Z 玻色子以及光子都拥有单位 1 的角动量，即它们自旋为 1。如果没有希格斯粒子，它们的质量都为零。

零质量、自旋为 1 的粒子有两个独立的自旋态：自旋可以和运动方向相同或相反。量子力学告诉我们，没有第三种可能性。一个玻色子可以处于这两种量子态的叠加，但只要你进行测量，得到的结果非此即彼。

对无质量玻色子而言，这当然没有问题，因为无质量粒子总是以光速运动。光速是有质量物体永远无法达到的速度上限。因此，作为有质量的人，你永远无法跑过无质量玻色子。事实上，你甚至无法和它们同速运动，否则它们的“运动方向”将无法定义，因为对你而言，它们将**没有**运动。但由于你无法达到光速，所以不会出现麻烦。对任何观察者而言，无质量粒子的速度都是 c，所以它们的运动方向总是可以定义的。

如果无质量玻色子通过某种方式获得质量，就会出现麻烦。现在，粒子可以处于静止状态，纹丝不动。它的自旋朝向何处？为了完整描述角动量为 1 的静止粒子，我们需要第三个选项。选取某个方向记为“上”，则自旋可以朝上、朝下或和给定方向垂直。自旋为 1 的原子即如此，我们将测量三种可能自旋态。有质量的运动粒子亦同此理，自旋可以和运动方向相同、相反或垂直。

虽然这些听起来距离日常现实很遥远，但自旋为 1、无质量的光子只有两种自旋取向的事实其实早已为我们熟知：光能够以两种（也只有两种）不同方式偏振。这是偏光太阳镜的工作机制。当光从物体表面反射时，反射的大小取决于偏振方向以及波长和入射角。对于一些入射角和波长，那些电场振荡方向平行于物体表面的光的偏振将比其他部分更容易被反射。[①]偏光材料能够选取两种偏振方向中的一种，去掉横向偏振，而让另一偏振通过。最终效果是，只有一半的直射光

① 费曼面向普通读者的一本介绍 QED 的书很好地解释了背后的量子力学过程。虽然有些难度，但如果你想更好地理解量子物理，我建议你不妨一读。

可以通过镜片，而反射光（例如潮湿地面的反光）的强度大大减弱。如果你将两片偏振片叠在一起，使其偏振方向相互垂直，则没有任何光可以通过，因为光子没有第三种偏振方向。

然而，有质量、自旋为 1 的粒子拥有三种可能偏振方向。物理学家将这第三种可能性称为另一“自由度”。为了完整描述一个物理系统（此处即一个玻色子），你需要此额外的东西。在基础物理中，自由度不会无缘无故增减。这对标准模型似乎是个大麻烦。W 和 Z 玻色子若想获得质量，就必须得到额外的自由度。它们从何处获得额外自由度?

BEH 机制完美地解决了这个问题，同时回避开了戈德斯通定理，移除了它所预言的无质量标量玻色子。[①]BEH 机制引进了一个新的量子场（BEH 场），它处处非零。BEH 场所属的类型[②]决定了它有四种激发方式，或者说四种可能粒子，或者说四种不同类型的波——四种不同自由度。这就是此想法的困难所在，因为其中三种粒子没有质量，而且没有一种粒子在现实中被发现。

令人惊讶的是，当把这两个问题（额外的无质量标量戈德斯通玻色子和只有两个自由度的顽固无质量规范玻色子）放在一起时，它们将相互抵消。具体过程如下：

(1) 我们有四个无质量玻色子——三个来自标准模型中的 SU(2) 群，一个来自 U(1)群。[③]

(2) 三个 SU(2)玻色子中，一个带正电荷，一个带负电荷，一个不带电荷。U(1)玻色子不带电荷。

(3) 三个玻色子（其中两个是 SU(2)中带电荷的玻色子，即 W^+和 W^-，另一个是两个中性玻色子的某种线性叠加，形成 Z 玻色子）吸收

---

① 参见 4.7 节“锁定希格斯粒子”。

② 即双重–复标量场（complex scalar doublet）。但不知道这点也无所谓。

③ U(1)和 SU(2)的含义参见“术语：规范理论”（第 98 页）。

（或者说“吃掉”）三个无质量标量玻色子，并且利用它们提供获得质量所需要的额外偏振自由度。

(4) 光子不屑于吃掉这些食物，所以仍然保持无质量。

(5) 四个标量玻色子中仍有一个剩余。它也有质量，所以仍然是个麻烦。直到 7 月 4 日，我们找到了它。

以上就是我们相信希格斯粒子的质量与W和Z玻色子相差不多的原因，也是我们相信（它如果存在）必定能在 LHC 上找到它的原因。在某种程度上，它们都是相同的粒子，或者说场。希格斯玻色子与 W 和 Z 玻色子并无两样。

这就是希格斯粒子和规范玻色子之间的密切关系。相比之下，它和费米子之间的关系就显得不那么密切了。在费米子情况中，希格斯粒子的角色只是让费米子获得质量。关于质量大小，并没有真正的预测。而且它赋予费米子质量的方式与赋予 W 和 Z 玻色子质量的方式有本质不同。

我们通过光子衰变道、Z 玻色子衰变道和（一些迹象表明）W 玻色子衰变道发现新玻色子。这些衰变道大致上吻合预期分支比的事实充分说明，无论我们发现了什么，它都将和电弱对称性破缺有关。所以我个人已经可以很放心地称它为一个希格斯玻色子。然而，我们还没有见到此玻色子衰变成费米子。

125 GeV 的标准模型希格斯玻色子最普遍的衰变过程是衰变成费米子——底夸克–反夸克对。不巧的是，在 LHC 中有很多过程都能生成这种衰变产物，所以将有用信号从背景噪音中提取出来非常困难。Tevatron 也遇到相似困难，因为此衰变模式是他们寻找希格斯粒子的最佳途径，难以回避。我和亚当、马蒂厄、加万合作的“提速的希格斯粒子”搜寻论文想要解决的就是这个问题，它也是“提速”会议年

年举办的一个原因。在那篇论文中我们大胆断言，我们的新技术[①]将对LHC的希格斯物理产生巨大影响。在瓦伦西亚那些持续很久的午餐时间里，我们在餐桌上讨论的问题之一就是那些断言是否合理。

我们在论文中提出了一些方法，可以更容易地将希格斯粒子的底夸克衰变从背景中提取出来，基本出发点是LHC生成的许多希格斯玻色子运动速度将非常快——提速的。我们发明的方法在LHC处于更高能量时（接近于设计能量14 TeV，2012年我们达到了8 TeV）将更有效。更高亮度当然也很有帮助。即便如此，我们的论文对8 TeV实验数据中的搜寻工作（尤其是提速的希格斯粒子）也产生了影响，CMS和 ATLAS 在希格斯衰变成底夸克的搜寻论文中都引用了那篇论文。这些技术也启发了大量其他论文，其中一些和希格斯粒子有关，但还有一些与强相互作用以及超出标准模型物理的搜寻有关。其中大部分也是"提速"会议中的热点话题。我可以说，到目前为止那些断言还是部分合理的，至于它对希格斯粒子搜寻中喷注次级结构的全面影响还未有定论。

除了底夸克，在这些数据中我们唯一能够测量的另一种费米子衰变就是衰变成τ轻子。有关搜寻仍在进行中。

虽然只是人为判断和个人偏好的问题，但如果我们观测到希格斯粒子大致上以预测的比率衰变成这两种粒子（τ子和底夸克），我很可能将决定称呼新玻色子为那种希格斯玻色子（the Higgs），而非某种希格斯粒子（a Higgs）。当然，这也不能说明它百分之百是标准模型希格斯玻色子，而寻找其中潜在的细微区别将成为很有趣的工作。不过，这足以支持使用定冠词了。

① 参见1.7节"第一届'提速'会议"。

8.5　名字的背后

令人震惊的是，发现了某种希格斯粒子的消息刚公布，就有一些人开始在媒体上鼓吹改名。他们认为，只以一个人的名字命名新玻色子很不公平。这些行为令我莫名厌烦。

确实，不止一人对基本粒子质量的理论作出贡献；也确实，赋予粒子质量的对称性破缺机制实际上不应该叫做“希格斯机制”，我已经在本书中尽量加以注意。好几个人独立地提出了此机制，其中两个（布劳特和恩格勒特）比希格斯稍早，而哈根、古拉尔尼克和基布尔虽然提出得有点（很）晚，但他们的版本在某些方面更完整、更接近于现在的标准模型。如此而已。

然而，彼得・希格斯明确地言明了此玻色子，而其他人都没有明确提及。在其他两篇论文中，此玻色子的存在并不显然。而希格斯在论文中第一次明显提出，如果此机制在自然界中存在，我们将会发现一个新的有质量标量玻色子。

另一方面，在这个时候对名字产生争议不仅将成为伟大发现中令人尴尬的一个插曲，而且也难摆脱理论物理学家贪名逐利的嫌疑。别忘了，几篇理论论文写于 1964 年左右，而标准模型的其他部分大都晚于那个时间出现。随着其他部分慢慢出现头绪（电弱和 QCD 领域，W 和 Z 玻色子以及胶子的发现，所有夸克和轻子的发现），质量起源机制变得越来越重要，而失踪玻色子的搜寻工作优先级别也越来越高。人们开始严肃地计算希格斯粒子在对撞机探测器中可能出现的方式。其中一个影响深远的早期工作是约翰・埃利斯（John Ellis）、玛丽・加亚尔（Mary Gaillard）和季米特里・纳诺泡洛斯（Dimitri Nanopoulos）的论文，标题是“希格斯玻色子的唯象描述”，直接提到玻色子的名字。这篇论文发表于 1975 年，稍晚于 1973 年 Z 玻色子的首个证据在 CERN

的巨人气泡室（Gargamelle bubble chamber）被观测到，远早于实 W 和 Z 玻色子十年后首次被观测到（同样在 CERN）。

数以千计的人在其中作出了贡献。发现 W 和 Z 玻色子的 UA1 和 UA2 合作组发表了相关的搜寻论文，用了希格斯玻色子的名字。从上个世纪 90 年代到现在，ATLAS、CMS、Tevatron 和 LEP 实验中的许多人都在“希格斯小组”中工作。相当多理论物理学家痛苦地计算着希格斯玻色子在探测器中可能的出现方式，他们用了希格斯玻色子的名字。7 月 4 日我们公布结果时，桑德拉・科特纳（Sandra Kortner）和艾兰・格罗斯（Eilam Gross）是 ATLAS 希格斯小组的召集人。他们和其他更多人都有部分权力决定名字，而他们称它为一个希格斯玻色子。在现在这种接近尾声的阶段，仅仅因为看起来我们确实有了大发现而提起改名的事情，简直就是一种侮辱。

当然，鉴于诺贝尔物理学奖的公布即将到来，这些行为或许也是名誉权战争的一部分，尤其是在物理学奖最多只能颁发给三个人（而非三个合作组）的任性规则下。然而在当前氛围下，这些都是很荒谬的行为。所有正直的物理学家都在毫无杂念地庆祝伟大新知识的发现，而大众也比任何时候都更关注了解一个物理学结果，他们听说的就是希格斯玻色子（很幸运，上帝粒子的名字没有在大众中传播开来）。在 CERN 工作时发明了万维网的蒂姆・伯纳斯-李成了 2012 年伦敦夏季奥运会开幕式上的一个焦点，而伦敦残奥会开幕式上也出现了象征希格斯玻色子的示意舞蹈表演，仍被称为一个希格斯玻色子。毋庸赘言了。

第九章

下一步做什么？（2012 年 8 月及以后）

9.1 期待未来的星际飞船希格斯引擎

当然，生活仍在继续。

结果宣布十天后，在参加纬度音乐节上罗宾・英斯主持的一个活动并为 BBC 电台第四台的科学脱口秀《无尽的猴笼》（*The Infinite Monkey Cage*）录制一期节目时，我和布赖恩・考克斯讨论起了新玻色子的发现。我之所以要提到这个发现，当然，主要是担心"有权利自夸不用，过期作废"。布赖恩或许已经习惯了一个拥有明星科学家的世界，但我还没有。不过老实说，不只我有权利自夸，辛勤工作的数千同事、资助 LHC 研究的政府和纳税者，他们都有自夸的权利。同样，在周六下午的这个音乐节上，拥挤在"文学"大棚中的数千人（毫不夸张！）也都有自夸的权利。我觉得，我们所有人都应该感到自豪，为了胜利的结果，也为了大众的支持。

勉强来说，这也算是我们的发现拥有现实影响的一个证据。现实影响是困扰着科学家的一个话题，尤其是最近一段时间。其中有各种

各样的原因。“科学至关重要”示威运动[1]成功地向人们传递了一个讯息，即科学研究的经济和社会影响非常巨大，甚至可以说至关重要。这其实是功利主义，“最大多数人的最大幸福”不仅是某件事情是否值得做的判断标准，也是对错是非的判断标准。这也是杰里米·边沁的哲学思想，他对 UCL 的创办有非常深远的影响（他身着正装的遗像仍摆放在我们主楼回廊的玻璃箱中）。所以，或许你会觉得我作为一个 UCL 的人，多少也继承了一些功利主义。确实如此。

不过，科学界以及更广泛的学术圈也会经常传出不同声音，反对用边沁式标准判断科研。在英国，学术圈开始推广“卓越研究框架”（REF）。这是一项浩大工程，包括收集和整理全英国大学所做研究的信息。除了考查学术论文和其他“科研成果”，评估过程还会考查科研在学术圈外的“影响”。不必说这项工程的花费，单是评估现实影响的想法就已经引起了巨大争议。

这些争议需要得到调解。我们寻找希格斯玻色子，并不是因为它有用或者能够产生经济效益，纯粹是因为它很有趣，而我们是充满好奇心（curious）的人。[2]我们在意更广泛的影响吗？我们会自己享用胜利的果实吗？研究是否成功需要通过现实影响判断吗？现实影响究竟是什么呢？在纬度音乐节活动上，人们提出的很多问题都属于一种类型：“鉴于我们已经知道希格斯粒子的存在，它能给我们带来什么回报呢？”

官方回答是：发现新知识所带来的喜悦就是最好的回报。人类的意义之一就是对周围事物及其行为方式充满好奇心，而不论你是将它们看作造物者的神迹还是进化论的结果，或者两者皆有。

我们也可以说，作为这些研究中不可避免的副产物，技术和人才训

---

① 参见 4.1 节“科学至关重要”。
② 好吧，curious 的其他意思（稀奇的、奇怪的）对我们也适用。

练也是一种回报。英国物理学会经常撰文指出这个事实。2012 年 10 月，下议会议员阿洛科・夏尔马（Alok Sharma）主持了英国物理学会一个调研报告的首发活动，报告题目是“物理学对英国经济的重要性”。[①] 威斯敏斯特宫的会议室非常不适合演讲：新当选的英国物理学会会长弗朗西斯・桑德斯（Frances Saunders）刚开始她的演讲，就传来分组表决铃震耳欲聋的声音，持续了好几分钟。当她终于能够重新开始演讲，某个角落里的一群老头开始边碰酒杯边交谈，平白给演讲添加了嘈杂的背景音。有人告诉我他们都是男爵，但看上去是瞎猜的，不太可能是真的。我猜在权力中心也是鱼龙混杂。

英国物理学会的调研报告包含了物理学对英国经济重要性的翔实信息。它首先定义了经济中“依赖物理学的领域”，即“物理学的应用（以技术和专家的形式出现）对它们的存在至关重要的领域”，也就是说，如果没有物理学，这些领域就不会存在。从这个定义就可以看出，物理学家并没有参与报告的撰写，否则他们必定会声称万事万物的存在都依赖物理学：没有物理学，地球就不会绕着太阳转，你身体的原子就无法结合，任何东西就不会有质量。报告附录提供了将近一百个工业项目，从“原油的精炼”到“通讯设备的修理”，看起来确实很合理地勾画出了经济的部分轮廓。如果英国停止物理研究和教育，那些部分很快就会陷入混乱。

报告中有一些令人印象深刻的数字。2010 年度，物理学对英国经济产出的直接贡献是 770 亿英镑，或 8.5%。如果算上间接贡献，将超过 2200 亿英镑。这些工业领域提供了 390 万个工作岗位，而在依赖物理学的工业领域中每个工人的平均“总产值”比全部领域的平均总产

① 参见：http://www.iop.org/publications/iop/2012/page_58712.html.

值高两倍多。[①]虽然这些并非我研究物理学的理由，但它们是我们这个国家应该研究物理学的理由之一。而且我很高兴有人将这些数字写出来，如果我们不了解这些情况，或许英国的物理学研究有一天会被迫终止。

说了这么多，之前的疑问仍然存在，而且确实是个好问题：希格斯玻色子的存在对现实的具体影响是什么？

科学家有很多科研动机，而其中最基本的一个无疑是追求进步：有一些非常重要、仍然未知的东西等待我们去发现，而一旦发现了它们，将它们加入人类的知识宝殿中，总有一天会让全人类受益。理论物理学家保罗·狄拉克从事非常基础的物理研究（相对论性量子力学），他的研究完全和现实影响不搭边。然而，正如传记作家格雷厄姆·法梅洛（Graham Farmelo）在其传记中所写的，甚至狄拉克也很在意现实影响。狄拉克说：

> 在我的信念中，人类将永存，人类社会的发展进步将永无止境。只有相信这种假设，我的心灵才能获得安宁。只有为这永无止境的发展贡献自己微薄的力量，生活才有意义。

鉴于（例如）狄拉克方程预测了反物质的存在，所以他毋庸置疑作出了贡献。

从艺术和人文的角度来看，这种发展观似乎很天真，而且在那些领域是否成立也不显然。人类思想是否真正发展进步尚有争议，而我们倒行逆施的能力却明显存在。人们甚至可以争论什么才是发展进步或倒行逆施的行为，而且确实存在此类争论。但记载的人类历史表明，

① 在首发活动中，至少有两位出席的成功人士是我的前学生。虽然这让我很欣慰，但也让我觉得自己有些老了。所以我很高兴看到那些（疑似）男爵的出席，他们让我觉得自己还没有那么老。

人类对自己所处宇宙（包括人类自己的身体）的认识一直在持续不断发展，对它的影响也在持续不断增加。这种发展以及对发展的认识对人类的生活产生了巨大影响。现在的社会建立在过去的发展果实之上，而为了面对未来的挑战，我们需要现在持续不断的发展。

和其他许多国家一样，在英国，科研的“现实影响”已经成为经费资助机构考虑是否资助的一个因素。不仅 REF 如此，各种研究委员会也不例外。它们在考虑新项目的经费资助时，会要求被资助方提供“现实影响陈述”，预估他们的工作在学术圈外的影响。你可以用专利、创造的工作岗位或人们因此获得的技能衡量现实影响的大小。当然，正如我之前说过的，这种做法尚存争议。假设每个科学家都心存狄拉克精神，为何还有争议?

一个理由是，许多突破性的应用都是无心之举。突破来自一个在研究之初没有预料到的并常常和本来目的没有关系的方向。确实有这种情况，不过影响也是双向的。有关宇宙认识的突破性进展有时候也是应用性研究的无意结果。例如，天文学的许多开创性工作便是起源于为贸易改进导航手段或为帝国预言运势的研究。但尽管如此，在预估科研的影响时很有可能会遗漏其最深刻的益处，因为这些新事物从根本上不可预料和预测，这样的批评是中肯的。

另一个理由则稍显无理：学术圈中的一些人将追求知识看作比应用知识或传播知识在精神和智力上更高一等的行为。对此我不敢苟同。每个人都有自己的追求，例如，我实在不认为追求对生命（或质量）起源的理解比追求癌症的攻克更高级。而且不管怎样，这两种行为很可能将相辅相成。

第三个理由是，虽然“现实影响”评估是引导科研方向的一个工具，但究竟谁有资格担当评估工作尚有争议。事实上，很多研究者不愿意在研究委员会或大学担当评估工作。虽然不管愿意与否，我认为

总要有机构去做。没有哪个研究者有能力跨学科比较有机化学、粒子物理、药理学和行星科学等的卓越成果。所以即使在每个领域中都有同行评议制度作为选取卓越成果的方式，我们仍需要一个机构决定如何在各个领域间分配资源。除非任由政治家和公务员全权处理此事，否则至少需要一些科研人员参与其中，坐在评审委员会席位上，为了各个领域的平衡发展而据理力争。这时，每个领域的卓越科研成果在现实中的相对益处（即“影响”）不可避免地将成为一个考量因素。

我们需要这样一种科研氛围，在其中，科研在现实中的应用不只由一个个科学家推动，还会有科研领域的其他人助其一臂之力。对于那些将自己追求知识的时间分一些出来、以寻找成果的现实影响的同事，需要通过经费资助体系对其进行认可。作为一个物理系的主任，对我而言，收集证据证明这些人的努力是一项很有意义的工作，而且可以帮助他们获得认可。好的科研和好的应用我们都需要。当我女儿五岁时，她在学校做了一个科学实验，通过用手电筒照射某些材料以确定哪种最适合做窗帘。硬纸板胜出。很好的科学，可惜无法应用。我不认为硬纸板窗帘能拯救我们的经济。

然而，我不认为无差别地要求所有科研项目都提供成果影响的预估报告这种做法很合理。对于那些本来目的就是解决问题、有很明确应用方向的研究，或许确实可以。但估计在那些研究中，本来就应该以那种方式撰写经费资助申请。对于其他研究，这种要求通常最好的情况就是浪费一些时间，而在最差的情况下，它将扼杀无法预料的突破性成果，对科研活动和经费利用形成短期利益误导。由纳税者资助的研究项目不应该受到这种误导。即使误导无可避免，它也应该只在商业研究中出现。

要收集充分证据证明哪种科研制度更好并非易事。我觉得，理论上我们需要比较两种经济体系。在一种经济体系中，拥有潜在长远利

益的科研项目将获得资助，而在另一种体系中，只有可预见的、有短期利益保证的科研项目方能获得资助。我当然不愿意待在第二种经济体系中。

回到原来的问题：希格斯粒子的应用。我不想说它完全没有应用，而且我觉得，总有一天它或许会有一些应用，虽然现在我无法想像那是什么。即使在有生之年仍见不到那一天，我也不会惊讶。但万一我们的后代发明了星际飞船希格斯引擎或者其他离奇的东西，他们必将感谢我们积累了这些基础知识，以支撑起他们神奇的新技术。

而现在，我们只需要满足于基础研究的那些副产物，以及发现的乐趣。

9.2　希格斯玻色子的下一步

新发现的玻色子在今后一段时间内将会被全面审查。世界各地的粒子物理学家将尽其所能精确地测量它的性质，找出它背后隐藏的秘密，看它能否为我们解决其他物理谜题提供线索。

好几个问题已经得到了解答。由于我们测量了新玻色子衰变成 Z 玻色子对和光子对的过程，所以马上就能推知它本身必须是玻色子，即它必须拥有整数角动量：0，1，2，等等。这是角动量守恒的结果。[①]

事实上，由于光子无质量，所以我们推知新玻色子的自旋不能为 1。这是朗道–杨定理的结论。朗道–杨定理可以追溯到 1948 年，当时 QED 刚出来，而人们正在试图理解介子是什么。这部分内容很艰深，所以如果不想看，完全可以跳过去。它大致上可以描述如下。

首先，无质量光子的自旋只有两种可能取向，对应于光的两种可

① 无法通过两个整数自旋（两个自旋为 1 的 Z 玻色子，或两个自旋为 1 的光子）结合产生一个半整数自旋（费米子）。

能偏振。[①]这些取向和你选定的方向相同或相反。我们可以将其中一个光子的运动方向定义为坐标轴方向，则另一个光子将朝相反方向运动（至少在新玻色子处于静止状态的坐标系中）。在这种情况下，两个光子的自旋允许有两种不同的排列方式。

一种方式是，两个自旋都朝向同一方向，因此它们的自旋相加，光子对沿着坐标轴的总自旋为 2。如果新玻色子的自旋为 1，则它无法衰变生成自旋为 2 的结果。所以我们可以排除这种方式。

剩下的一种方式就是两个自旋朝向不同方向，因此两者相互抵消，得到的总自旋为 0。这本身并无问题。新玻色子的自旋可以为 1。有质量的新玻色子自旋可以和选定的坐标轴垂直，在这种情况下，它可以衰变成两个光子，而光子对沿着坐标轴方向的总自旋仍为 0。然而，朗道和杨振宁（独立地）注意到了另一件事：这两个光子是全同粒子。唯一能够对其加以区分的是它们的自旋在它们自己运动方向上的取向。但在刚才这种排列方式中，自旋的取向一样——都和它们自己的运动方向同向（或反向）。在一个量子系统中，如果交换两个全同玻色子，你仍然得到相同的量子系统，不会出现负号。[②]你可以通过将整个系统在原点处绕着垂直于光子运动方向的坐标轴旋转 180 度来实现两个光子的交换。但对于新玻色子这样角动量为 1 的球形系统，如此旋转 180 度将带来一个负号。[③]

终于到了关键时刻。由于初态（新玻色子）中的−1 和末态中交换全同玻色子所要求的+1 相矛盾，所以自旋为 1 的玻色子无法衰变为此

---

① 参见 8.4 节“定冠词？”。

② 这个结论并非显然，而且对费米子不成立。参见“术语：玻色子和费米子”（第 32 页）。

③ 这对奇数角动量球谐函数都成立。球谐函数是描述球面上波动的一组方程组。试想一个波在球面上振动，球面北半球朝上，南半球朝下。如果将球颠倒，振动的相位将改变 180 度。这等价于振幅乘以−1。

种自旋排列方式的两个光子。如果我们观测到双光子衰变模式（确实如此），则新玻色子的自旋不可能为 1。

我提醒过你这很艰深。不过由于它在物理报告中经常被提及却又不加以解释，所以我早就想通过自己的理解再对它加以解释。如果你跳过了上面几段，欢迎回归此处。

从我们观测到的衰变中还可以提取更多信息。Z 玻色子和光子的生成角度包含了新玻色子角动量的信息。在宣布发现后的几个月时间里，我们对其进行了非常精确的测量，足够表明新玻色子的自旋为 0。虽然这也没有完全排除其他自旋（例如自旋为 2）微小贡献的可能性，但我们观测到的主要粒子必然是一个标量玻色子。

标准模型希格斯玻色子的另一个特征是，它必须拥有“偶 CP”。CP 是两种对称性的组合操作。“C”（来自“charge”）代表电荷共轭操作。一个系统是否有电荷共轭对称性（C 对称性）取决于在交换所有相加性量子数后系统是否发生变化。这基本上意味着交换物质和反物质，因而正电荷变成负电荷。如果系统并无变化，说明它在 C 对称性下为偶。“P”（来自“parity”）代表空间反演操作，即宇称。它比较容易理解：交换左右位置，或者说反转系统。它可以改变自旋的方向。[①]CP 对称性可以说是标准模型的严格对称性，也就是说，物理学并不在意我们是由物质还是反物质构成的。但我们观测到的宇宙显然在意——它几乎完全由物质构成。从如此对称的理论中推导出如此不对称的宇宙是个巨大挑战，而且需要一些 CP 对称性破坏的来源。而许多新理论（例如超对称）可以提供 CP 破坏。所有这些都说明一件事：测量新玻色子在 CP 反转操作下的性质非常重要。测量结果和标

① 再回到球谐函数。所有偶数角动量（0, 2, 4, …）球谐函数都拥有偶宇称，记为 +1。所有奇数角动量（1, 3, 5, …）球谐函数都拥有奇宇称，记为 −1，即它们在反转操作中改变符号。

准模型的任何区别都有可能为解释我们由物质而非反物质构成提供线索。

CP 对称性取决于一个系统在镜像操作和电荷反转后的变化。鉴于新玻色子的自旋为 0，电荷也为 0，你或许会认为它很显然在 CP 对称操作中保持不变，因此拥有偶 CP。然而，自然界确实存在不带电的标量玻色子，却拥有奇 CP。中性 π 子（π_0）就是一例。它由上夸克和反下夸克以及反上夸克和下夸克构成，而夸克混合的方式保证了交换物质和反物质（C 操作）后它仍然保持不变。但镜像操作后，描述混合方式的量子波函数出现一个负号。所以它拥有偶 C，奇 P（奇宇称），奇 CP。

标准模型希格斯玻色子拥有偶 CP。衰变产物的角分布同样对新粒子的 CP 对称性敏感，而它们同样很强烈地预示新粒子拥有偶 CP，符合希格斯玻色子的预期。随着更多测量结果的出现，CP 对称性和自旋将能得到更确定的结果。

我在上一章提到过，希格斯玻色子可以通过几种不同的方式衰变，而测量每种衰变模式的分支比（即衰变相对比率）能够告诉我们一些新东西。鉴于希格斯玻色子在电弱对称性破缺中所起的作用，它的 W 或 Z 玻色子衰变模式至关重要。而标量场的 BEH 机制为 W 和 Z 玻色子获得质量提供了所需的额外纵向偏振态，同时为标量场本身和希格斯玻色子提供质量。更精确地测量这些东西将永远是热门课题，因为它们是标准模型中非常重要、非常基本的部分，将会影响标准模型的细节修改。

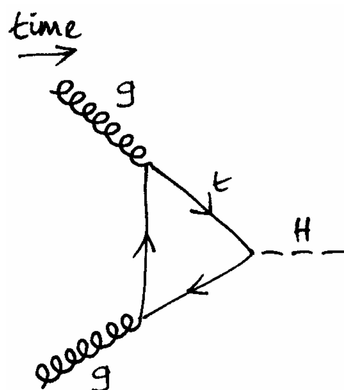
到光子的衰变模式非常奇怪。由于光子无质量，它并不直接和希格斯玻色子耦合，只能通过量子圈图生成。[①]任何拥有质量和电荷的粒

① 参见 6.4 节“串联起震惊、凸起和无知的希格斯玻色子”。

子理论上都有可能出现在圈中——质量让它们可以和希格斯玻色子耦合，电荷让它们可以和光子耦合。在标准模型中，最主要的圈图贡献来自 W 玻色子和顶夸克。但谁说得准呢？或许其他目前未知的粒子也会有贡献呢？所以对此进行测量将永远令人感兴趣。

然后就是费米子：夸克和轻子。之前已经指出，将它们从背景中筛选出来是个巨大挑战。但我们不得不做这项工作，因为希格斯玻色子和费米子耦合、赋予它们质量的方式与 W 和 Z 玻色子的情况完全不同，知道玻色子的情况并不能推导出费米子的情况。

我们可以推断它和顶夸克耦合的一些情况，因为根据标准模型，我们观测到的许多希格斯玻色子其实是由另一种量子圈图生成的。在此圈图中，质子中的胶子（无质量）和夸克（通常是顶夸克，因为它最重）耦合，后者再和希格斯玻色子耦合，如下图所示：



我们观测到了和预期差不多数量的希格斯玻色子，这为我们提供了间接证据，表明新玻色子确实和顶夸克耦合，因此通过 BEH 机制赋予顶夸克质量。但顶夸克比较特殊，它是标准模型中最重的基本粒子，所以我们不难推测，对于更“普通”的夸克，或许会发生其他情况。测量希格斯玻色子衰变成底夸克和反底夸克是一项可以做的重要测

试，而要在高能区域进行此项研究，很可能需要用到提速的格斯玻色子对撞事例中的喷注次级结构。

轻子也会有所不同。最简单的情况是 τ 轻子，因为它最重，因而最容易生成。2013 年 12 月，在完成 2011 年和 2012 年实验数据的彻底分析后，ATLAS 和 CMS 公布了很有说服力的证据（虽然不到五个 σ，但远大于三个 σ），表明希格斯玻色子衰变为 τ 子–反 τ 子的过程确实发生。因此，它成为 BEH 机制赋予轻子质量的首个直接证据。很显然，提高结果的显著性、让测量更加精确已经成为了当务之急。

所有上述费米子（τ 子、底夸克和顶夸克）都属于“第三代”，其中包含的（加上 τ 子中微子）都是最重的粒子。我们也需要观测希格斯玻色子和其他代粒子的耦合，以确信其中没有奇怪的情况。第一代粒子（上夸克、下夸克、电子和电子中微子）在可预见的未来毫无探测的可能性，因为它们质量太小，以至于希格斯玻色子几乎不会衰变成它们。但对于第二代粒子（粲夸克、奇异夸克、μ 子和 μ 子中微子），我们瞥见了 μ 子和粲夸克的踪迹。

对于每一种新衰变的测量，你可以质疑，它是否真的和其他衰变一样来自相同的粒子。所以对每一种衰变的自旋和空间反演性质进行反复测量非常重要。质量的测量也同样重要。在 ZZ 和双光子衰变道中测量到的质量，在实验不确定性（几个 GeV 量级）范围内，到目前为止还是相互一致的，但就像粒子物理学家在紧张关注某样东西时经常会说的：还存在一些“电势差”（tension）。ATLAS 中两个衰变道的测量之间存在 2σ 的区别。随着我们获得更多数据，不确定性将缩减，我们也需要更加仔细谨慎，以确信我们是否得到了两个质量不同的玻色子，一个衰变为光子，另一个衰变为 Z 玻色子。对于 WW 或 τ 子–反 τ 子衰变道而言，质量的精确测量非常困难，甚至或许根本不可能，因为在 τ 子衰变过程和 W 玻色子衰变成轻子的过程中生成了不可见的

中微子。如果能够筛选出底夸克衰变道，我们应该能对质量进行一些测量，但也不能期待和 Z 玻色子或光子的情况一样精确。在此情况下，双 μ 子衰变道的质量测量可以做到非常精确，因为 ATLAS 和 CMS 都可以非常精确地测量 μ 子。

如果希格斯玻色子的质量稍微偏移几个 GeV，我们能够测量的衰变道将减少。若高一些，希格斯玻色子到夸克和到轻子的衰变道就不可能出现，因为一旦希格斯玻色子的质量足够生成实 Z 玻色子对或实 W 玻色子对，ZZ 和 WW 衰变道就会成为主导。[①]若低一些，W 和 Z 的衰变将变得非常罕见，以至于难以发现它们，或者至少比现在困难得多。正如法比奥拉在 7 月 4 日所言："如果新玻色子就是标准模型希格斯玻色子，它的质量大小简直就是我们的万幸。"

关于新玻色子，还有两件事情我想知道。

新玻色子衰变成第一代粒子（上夸克、下夸克和电子）、中微子和奇异夸克的过程或许确实不可能直接测量。但如果有合适的机器，我们也有可能测量总宽度，即质量分布图中凸起的真实宽度。质量（或能量）凸起的宽度可以告诉我们粒子的生命期。[②]不幸的是，在我们测量到的分布图中，宽度受限于探测器的分辨率。所以为了测量宽度，我们或许需要一个轻子对撞机。详情后述。

最后一点。为了让整个标准模型内部一致，BEH 场不仅需要赋予其他粒子质量，也需要赋予希格斯玻色子自身质量。这需要通过"自耦合"（self-coupling）过程——三个或四个希格斯玻色子相遇于一点的费曼图。事实上，解决这个问题可以让我们确定 BEH 机制中对称性破缺场的全部特征。在酒瓶（或墨西哥帽）类比中，这等价于测量酒

---

① 两倍 W 玻色子质量是 160 GeV，两倍 Z 玻色子质量是 172 GeV。

② 它们互为反比。如果愿意，你可以将其想像为海森堡的不确定原理。能量的不确定度乘以时间的不确定度约等于普朗克常数。

瓶底部（或墨西哥帽）的形状。它是宇宙中背景场的形状。相当值得了解。

总之，希格斯玻色子的未来很繁忙。

9.3 彼得·希格斯的下一步

当彼得 · 希格斯被问及如何庆祝 7 月 4 日的结果宣布时（当时他出现在 CERN 的观众席中），他回答，他在日内瓦回英国的飞机上喝了一杯伦敦之巅啤酒以示庆祝。

他还有更多可以庆祝的事。2013 年 11 月 8 日，ATLAS 合作组一大群人聚集在摩洛哥马拉喀什的一个视频屏幕前，等待诺贝尔物理学奖的公布。

阿尔弗雷德 · 诺贝尔在遗嘱中写道，他希望用他的财产设立年度奖金：

> 颁发给在前一年中为人类作出杰出贡献的人。基金会所得利息均分为五份，以如下方式分配：一份颁发给在物理领域作出最重大发现或发明的人……

（后面跟着另外四个不怎么有趣的领域）。[①]

出于一些原因，诺贝尔物理学奖评委会不太在意“前一年”的规定——奖项颁发经常晚于发现很多年。而“……的人”也被扩充到“最多三个人”。但它肯定不会颁发给三个以上的人，而且不同于和平奖评委会，它不会将机构或合作组当作“人”。另外它也不会颁发给已故之人。

① 开玩笑的！其他四个是化学、生理学或医学、文学、和平。经济学是由其他资金来源增设的。

这意味着，那些用实验真正发现了新玻色子的人似乎完全没有获奖机会，因为涉及人数众多，根本不可能将名单列表缩小到三个人，哪怕（如同其他声名卓越的奖项一样）只考虑将各个实验组的发言人和加速器的主任选为代表。评委会还面临着另一个窘境，提出 BEH 机制的第三个独立小组（哈根、古拉尔尼克和基布尔）难以全部挤进获奖名单。

诺贝尔评委会还面临着一个窘境，即如何确定实验数据中的凸起（新玻色子)真的和电弱对称性破缺以及质量起源有关？又如何确定它就是布劳特、恩格勒特、希格斯、哈根、古拉尔尼克和基布尔提出的机制现身于自然界中的证据？我不是评委会的成员，但对我而言，既然实验数据表明它很可能是一个偶 CP 的标量玻色子、可以和 Z 和 W 玻色子耦合[①]，就已经足够确定了。甚至或许不止足够了。但我们仍然不能确信它就是“标准模型希格斯玻色子”。在某种程度上，我们永远无法确信，因为随着我们比以前更精确地测量新粒子的性质，偏离标准模型预期的情况随时可能出现。不管怎样，“六人帮”也并没有专门提及“标准模型希格斯玻色子”。标准模型当时甚至并不存在，它的出现还需要许多理论物理学家的工作以及实验获得的数据。20 世纪 60 年代“六人帮”的重要创新之处是提出一种机制。在那种机制中，规范对称性对应的作用力和有质量基本粒子可以共存。在后来出现的标准模型中，电弱对称性破缺和那种机制息息相关，因而新玻色子衰变成 W 和 Z 玻色子的过程至关重要。

物理学奖毫无意外颁发给了弗朗索瓦·恩格勒特和彼得·希格斯，另外一个可能的获奖者空缺。许多人认为这是为了致敬已故的罗伯

① 截至目前，ATLAS 和 CMS 的数据一起构成了 WW 和 ZZ 玻色子衰变道非常显著的信号。

特·布劳特。[1]马拉喀什响起一阵欢呼声，因为 ATLAS、CMS 和 LHC 都在颁奖理由中被提到。

奖项？我想，每个奖项都有它的目的，而弗朗索瓦·恩格勒特和彼得·希格斯的诺贝尔奖毫无疑问当之无愧。但是（这里有个"但是"）奖项给科学研究强加了一个扭曲的看法。它助长了一种想法，即科学进展来自单个天才的突破性工作。在现实中，虽然天才和突破性工作确实存在，但累积式工作和合作组对于丰富我们对大自然的认识更加重要。即使是获奖的突破性理论工作，也需要无数聪明人所贡献的、逐年累积的知识在背后支撑。真实希格斯玻色子的发现（证明理论想法确实在大自然中存在）需要感谢上千科学家的工作。ATLAS 中有三千多人，CMS 也有相同规模，另外还有数百人服务于 LHC。虽然诺贝尔奖在颁奖理由中认可了我们的努力，但我仍然希望其他奖项能够更直接一些。或许来年吧。总之，对物理学，对粒子物理，对恩格勒特和希格斯，这都是值得庆祝的伟大时刻。

希格斯显然不是将自己推到闪光灯前的人，但在闪光灯下，他表现得非常好。他笑逐颜开地和每一个要求合照的人（包括很多实验组成员）合照，和迎面而来的人握手，在诺贝尔奖公布几个星期后出席在伦敦科学博物馆举办的 LHC 大型展览。他在展览中的任务包括面向学生的一次持续很久的问答环节以及和财政大臣乔治·奥斯本（George Osborne）的共同演讲，后者在演讲中强调了基础研究的重要性。我们可以将此看作英国政府对基础研究的长线态度，我们在 CERN 中的会员国资格一直受到政府的有力支持。

另一件值得一提之事。伦敦之巅啤酒的生产商富勒啤酒厂推出了一款特制啤酒，酒瓶贴有标签"杰出的彼得·希格斯教授"。我的办公

① 这就是我为什么一直使用"布劳特–恩格勒特–希格斯"（BEH）机制的原因。

室里现在就骄傲地摆放着这样一个空瓶。

在这些事情结束几个星期之后（中途还有一次瑞典斯德哥尔摩之旅，领取诺贝尔奖章），已经退休的彼得·希格斯说，他很期待能够再次退休。

9.4 LHC 的下一步

7 月 4 日结果宣布之后，LHC 上的高能质子–质子对撞很快恢复运行，一直持续到 2012 年 12 月 17 日。这些实验数据强化了新粒子的发现，而且我们也能够对 9.2 节提到的一些东西进行更精确的测量。

2013 年初，在一段时间的重离子运行和技术性运行后，我们关闭了 LHC，进入“长时间休整”阶段。状态显示屏上留着一段信息：第一阶段运行结束。暂无粒子束。预计等待重启时间：两年。

在这两年中，我们需要完成很多工作。加速器将从工作温度 1.9 开尔文（–271 摄氏度）升温到正常温度，以便于人们对 2008 年发生了巨大故障的那种类型连接器进行全面检查，对它们加以测试、替换和保护，确保之后电流能够安全地增加到设计值。在此情况下，弯曲磁铁可以满负荷工作，使质子束的能量提升到 7 TeV，达到质心对撞能量 14 TeV 的最初目标。

探测器也需要进行全面维护。例如，ATLAS 的整个像素探测器需要被取出、翻新，再重新安装回去。执行能力的改进以及（最重要的）额外提升的能量允许我们探索电弱对称性破缺能标之上的区域，或许那里将有惊喜出现。详情稍后再叙。在我写下这句话时，更高能量粒子束的重启工作预定在 2015 年初进行——实际上，4 月 1 日。[①]

① LHC 于 2015 年 4 月 5 日重启，于 5 月 20 日达到每粒子束 6.5 TeV 的能量，并于 6 月 3 日开始第二阶段运行。——译者注

展望一下 LHC 更遥远的未来。如果不能完全重新设计制造弯曲磁铁，则我们无法进一步提高 LHC 的能量。但通过提高加速器真正发生对撞的事例所占比例，我们可以等效地提高能量和精度，因为真正起作用的其实是夸克和胶子的对撞能量。从这种角度来看，LHC 其实是夸克和胶子对撞机。我们能够获得的夸克或胶子最高能量取决于质子的能量乘以一个分数，即夸克或胶子携带的能量和质子总能量的比率。因此，如果在给定的 14 TeV 质子–质子对撞中，每个夸克携带相应质子三分之一的能量，那么夸克–夸克的对撞能量将是 14 TeV×1/3=4.7 TeV。可惜，夸克携带质子三分之一能量的情况十分少见，而随着携带比例的提高，出现的概率也越来越低。但有一件事情不会错：质子–质子对撞事例越多，夸克–夸克对撞事例也就随之越多，测量时的等效能量也将随之增加。

这是 LHC 亮度升级的主要动机，计划分两个阶段施行。第一阶段计划在高能运行几年后施行。所以在 2017 年到 2018 年间，LHC 将因此重新休整。第二阶段的时间表和目标仍在讨论中。除了 LHC 自身的升级，探测器也需要进行重大升级，以便它们能够跟上提升的数据产生速率。通过这些升级，LHC 能够继续进行令人激动的新物理测量工作，直到 2030 年甚至更久。

9.5 标准模型的下一步

利用升级的 LHC 以及（幸运的话）其他机器，我们必定会做的一项工作是仔细地审查标准模型在电弱对称性破缺能标之上的准确性。这已经超出了 9.2 节提到的有关希格斯玻色子性质的研究。别忘了，此能量区域和我们之前所有探测过的能量区域都有本质不同。在此区域，电磁力和弱力得到了统一，它们的强度差不多大小。如果没有希

格斯玻色子的发现，它就是标准模型无法触及的禁区：理论无法预测此能量区域中的物理，因此只能降级为一个低能“有效理论”——虽然对几百 GeV 以下的能量区域非常准确，但在电弱对称性破缺能标以上毫无用处。

由于希格斯玻色子的发现，标准模型迎来了生命的又一春：它可以预测非常高能的物理——无疑覆盖了升级的 LHC 能够探测的所有东西。这是很大胆的断言，而验证其是否正确是很有趣的工作。具有确定质量的新玻色子的发现激发了大量理论工作，形成了我认为很有趣的一个研究方向。很多工作都非常技术性，而其中最普遍的一个主题是重新审查标准模型中的对称性和量子修正，看它们是否包含更多未曾考虑过的物理。各种类型的（有可能是误导性的）线索比比皆是，里面有很多可以玩的游戏。例如，考虑一种数值巧合：所有费米子质量的平方和很接近所有玻色子质量的平方和，两者只相差一个百分比左右。[①]鉴于顶夸克和希格斯玻色子质量拥有很大的不确定度，约等式很可能其实是恒等式。换句话说，如果你发现一种对称性，要求所有费米子质量的平方和恒等于所有玻色子质量的平方和，就可以预测希格斯玻色子的质量为 123 GeV。和我们测量到的结果差不多！

然而，我们尚未发现这种对称性，所以目前它仍然只是一种数字游戏。还有许多数字游戏，至少看起来不无道理。例如，由于夸克有三种色荷，所以在夸克的数字前难道不应该有个因子 3 吗？由于有两种 W 玻色子（W^+和 W^-），所以它的数字前难道不应该有个因子 2 吗？如果考虑这些，那么你“预测”的希格斯玻色子质量将是 262 GeV。没有奖励！人们还有其他方式“预测”或捕捉巧合，但方式越多，巧

① 即 $M_{top}^2+M_{bottom}^2=M_w^2+M_z^2+M_{Higgs}^2$（所有其他粒子质量都很小，可以忽略不计）。代入已知数值可得：$173^2+5^2\approx80.4^2+91.2^2+125^2$，即 $29954\approx30406$。

合被发现时的意义就越低。譬如找遍了一百万个不同的地方，你很可能将发现百万分之一概率的事件。同样地，或许某些数字游戏可以给你提供线索，但只有当这些线索对应于真实的动力学理论时，它们才有意义。如果它们没有推导出任何东西，它们就毫无意义。所以我们需要做的是测量和真正的计算，而非玩一些数字游戏。

有趣的是，确实存在一个类似的关系式。它在发现希格斯玻色子之前就已知，而且基于一些真实的标准模型计算。它和希格斯玻色子质量的量子修正有关，而超对称的提出就是想要解决这个问题。[1]马丁努斯·韦尔特曼（他和杰拉德·特·胡夫特由于“阐明电弱物理中的量子结构”而获得 1999 年的诺贝尔物理学奖）算出了这些量子修正[2]，其中只考虑了当时已知的粒子——所以不包括超对称。由于那是 1981 年的工作，当时顶夸克和希格斯玻色子都尚未被发现，所以实际上他领先于那个时代。而且，即使他假设了这两种粒子的存在，他也不知道它们的质量。不管怎样，他计算发现，如果在粒子质量之间存在某种关系式[3]，则第一阶修正（只含有一个圈的费曼图）将全部相互抵消。在尝试了各种可能性后，他提出，如果希格斯玻色子非常轻，顶夸克的质量就有可能约为 69 GeV，这是当时人们猜测的顶夸克质量；而如果希格斯玻色子的质量和 W 玻色子相差无几，则顶夸克的质量将为 78 GeV 左右。

不幸的是，1996 年，CDF 实验终于发现了顶夸克，它的质量要高很多。而现在我们知道，顶夸克的质量约为 173 GeV，因此“韦尔特曼条件”意味着希格斯玻色子的质量约为 314 GeV……太高了。但由于所有粒子质量都需接受量子修正，所以它们将随能量变化，而现在

① 参见 4.7 节“锁定希格斯粒子”。

② 参见：*Acta Phys.Polon. B*12 (1981) 437.

③ $4M_{top}^2 \approx 2M_W^2 + M_Z^2 + M_{Higgs}^2$.

有一些论文提出，韦尔特曼条件或类似关系式将在标准模型的高能行为中起重要作用，或许还能避免希格斯玻色子质量丑陋的“精细调节”机制。另有一些论文提出，希格斯玻色子的质量由标准模型的其他一些近似对称性控制和保护，例如手征（chiral）或“左旋–右旋”对称性。我们实验物理学家是这些有趣竞赛的旁观者，但它们无疑也促使我们更精确地测量标准模型的一些关键过程。

其中一类重要过程是矢量玻色子对的生成——特别是 WW、WZ 和 ZZ。其中最有趣的是矢量玻色子散射。我在 1.2 节提到过，假若不存在希格斯玻色子，此过程将无法在标准模型中被预测。随后我变成了一个悲观主义者，提出如果希格斯玻色子不出现，矢量玻色子散射或许将成为电弱对称性破缺唯一的线索来源。但现在我们发现了希格斯玻色子，此过程也可以被预测，所以对它的测量将成为非常重要的试验，检验 BEH 机制是否真正以人们猜测的方式发挥作用。

还有其他许多罕见以及不那么罕见的过程我们现在可以计算，而在将来我们也可以对它们进行测量。我们刚走到超越电弱对称性破缺能标物理的边缘。

9.6　超对称和超出标准模型物理的下一步

如果你相信头条新闻，你将会发现超对称就是一个极端顽强的僵尸理论。它每隔一两个月就会被 LHC 再次“杀死”，或者至少“致残”或“送医”，但似乎永远不会真正死去。

这里面有些玄机。来自 LHCb 实验组以及 ATLAS、CMS 的 LHC 数据（加上 CERN 之前的实验、HERA 实验和 Tevatron 实验）已经排除了超对称理论的大量可能变种。但超对称作为一种想法永远不会消失。它拥有优美的数学结构，而且弦论、M-理论或很可能所有其他试

图将引力和量子场论相结合的尝试都需要它的存在。所以我觉得，它或多或少都将仍然是理论物理、宇宙学和数学重要的工具。

真正如履薄冰的是，超对称还能否在电弱对称性破缺或暗物质中起作用？或者说，它还能否在粒子物理实验曾经或将会测量的唯象中起作用？它能够成为拯救“自然性”想法的超人吗？[①]

这和圈图修正以及上节讨论的质量关系式紧密相关。超对称粒子同样能够出现在量子圈中，它们确保了一些单纯依靠标准模型无法实现的相消，因而回避开希格斯玻色子质量的“精细调节”问题。但精细调节是一个狡猾的概念。无论是 LHC 还是其他对撞机的数据，有关中子和电子“电偶极矩”（大致上就是测量电子或中子内电荷分布是否球对称）的精确测量都已经对超对称的可能参数进行了约束，而回避开这些实验约束已经暗含了某种程度的调整。最重要的是，超对称若想成功抑制希格斯玻色子质量的量子修正，那么至少部分超对称粒子的质量必须在电弱对称性破缺能标附近。所以如果 LHC 的下一运行阶段仍然未能找出一些超对称粒子，它的可信度就会大大降低，而许多理论物理学家也会开始放弃超对称，或者至少不再期望它解决精细调节问题。不管怎样，我觉得“超对称就在前面不远处”都将成为提议未来更大型实验的一个充分托辞。

然而，超对称只是（目前）标准模型最流行的一个扩充。虽然标准模型令人骄傲地预测了一个基本标量玻色子的存在，将自己的适用领域扩展到了电弱能标之上，但很显然它不是故事的全部。必然还存在着一些超出标准模型的东西，不管有没有超对称。

其中最引人注目的一个遗漏是引力。多亏了爱因斯坦，我们现在拥有一个几乎完美的引力理论，可惜它不是量子理论。时空是量子场

① 参见 7.5 节“大自然真的自然吗？”。

论的舞台，但在能量很高的区域，经典时空观和量子场论相矛盾，我们却不知道其中发生了什么。

此外还有其他问题或遗漏，包括宇宙中 85% 物质的消失——所谓暗物质，只能通过它对星系和其他天体的引力效应感知它的存在。暗物质是新的基本粒子吗？很显然，它看起来无法被任何标准模型粒子解释。此外还有更糟糕的暗能量，它占据了全宇宙（包括物质和能量）的 68%。从一个观点来看，“暗能量”其实只是一个代名词：宇宙因为一些未知的原因而加速膨胀，暗能量就是未知原因的代名词。此外，为什么我们由物质而非反物质构成？为什么存在三代基本粒子？为什么弱作用力只能感知左旋自旋的粒子，而忽视右旋自旋的粒子？中微子究竟是什么？为什么顶夸克如此重而中微子却如此轻？自然界中存在着许多此类似乎并无关联的故事，而某些心灵（例如我的）渴求着一个更完美的解释，而不仅仅是“我希望如此”。

9.7 CERN 的下一步

CERN 的会员国队伍仍在扩大。2012 年，塞浦路斯成为准会员国。2013 年，乌克兰也成为准会员国，而以色列成为 1999 年以来的第一个新会员国。其他好几个国家也在协商加入 CERN 或深化和 CERN 的合作。欧洲的政府和人民仍然坚信，在欧洲大陆中间拥有一个世界领先的粒子物理实验室是件好事。

很显然，今后几年 CERN 将忙得不可开交，升级和运行 LHC。而且，实验室的科研项目也多种多样，既有新加速器和新技术的研究，也有反物质和核物理的研究，遍布整个园区。

项目之一是设计一个新的直线对撞机，可以打破 LEP2 在高能正负电子对撞中创下的纪录。直线对撞机可以避免同步辐射导致的粒子

束能量损失[①]，因为其中的粒子束无须拐弯。然而出于相同的原因，粒子束也无法被储存——粒子束在一次撞击后就没了，我们必须重新开始。因此，加速过程必须非常迅速，对撞机必须非常长。能够达到的最大加速度以及加速器的长度决定了最高能量大小。唯一现存的一台高能直线对撞机位于美国加州的斯坦福直线加速器中心（SLAC）。它和 LEP 一起，为 Z 玻色子的精确测量作出了贡献。更新的设计以及更高的能量随后在 SLAC 和日本的 KEK 实现。而目前的宠儿是德国汉堡的 DESY 主导的超导加速腔设计。CERN 合作组作为全世界力量的一部分参与了那个机器的建造，同时也在积极筹划自己的版本：紧凑直线对撞机（Compact Linear Collider，CLIC）。若要满足能量的需求，DESY 的超导设计将令机器总长达到几万米。而 CLIC 通过利用低能、高强度粒子束将低强度粒子束加速至极高能量而缩短机器总长。

另一种潮流是设计更庞大的环形对撞机。初步调研结果表明，为更庞大的环形对撞机建造隧道并非不可能。和 LHC 一样，它很可能仍然对撞质子，但和 LHC 的 27 千米相比，它将达到 80—100 千米长。隧道将从日内瓦湖底延伸出去，环绕几座山。它的最高能量将瞬间让 LHC 相形见绌。能量具体数值取决于（和 LHC 一样）弯曲磁铁的能力。

最后一个例子是一种非常新颖的加速方法——所谓“等离子体尾波场”（plasma wakefield）加速。等离子体是物质的一种极热态，和早期宇宙（大爆炸后 30 万年左右）的条件相似，其中的温度非常高，以至于电子和核子间的电吸引力不足以让原子在频繁发生的高能对撞中保持完整。因此，电子和核子可以在等离子体中自由运动，相互碾碎。如果一束高强度粒子束构成的短脉冲（通常是激光）射穿等离子体，其中的带电粒子就会在脉冲尾波中振荡，所有带正电粒子跑到一边，

① 参见 1.1 节“为何如此庞大？”。

而所有带负电粒子跑到另一边，因而产生极高电势差。借助一定技术和时机，这种尾波场可以用来加速另一束粒子束，效率非其他技术能比。此加速方法已经被证明可以廉价地生成相对低能的粒子束。CERN的 AWAKE 项目（Advanced Wakefield，高等尾波场）试图利用质子束代替激光。模拟研究表明，如果能够将 LHC 生成的粒子束射击到恰当的等离子体中，原则上只需要经过几百米距离就可以获得高达几百 GeV 能量的电子束，而为此超导直线加速器需要 35 千米及以上。但还有许多困难需要解决，包括所得粒子束的强度目前还太小而毫无用处。这是一项设想中的长期项目，而 CERN 无疑会参与其中。

以上就是 CERN 参与其中的一些项目。而在日内瓦园区之外，CERN 理事会也负责“该领域的国际合作项目的组织和赞助事宜”。CERN 公约上写的是核物理研究项目（1953 年版本），但在公约的其他地方补充为“有关高能粒子的纯粹科学和基本性质研究”（亦包含宇宙射线研究）。为了回应此规定，同时也为了实验室的未来，我们在 2012 年到 2013 年度举行了一次战略部署。这和美国当时也在举行的一次相似部署遥相呼应，而日本提出的建议对此产生了巨大影响。此事传递出的信息是，CERN 的未来和粒子物理的未来休戚相关。粒子物理的未来只能在全球框架中讨论，而非局限于欧洲大陆。所以，该说说粒子物理的未来了。

9.8　粒子物理的下一步

这是一个狂风暴雨的漆黑夜。天寒地冻。

巨大的房间，几乎没有家具，偶尔有冰雹猛烈地拍打着古老的石头框架窗户。石头墙，没铺地毯的石头地板。虽然顽强的取暖器不折不饶地工作着，也只温暖了它周围 30 厘米半径内的空间。这就是我现

在的临时栖息地。我蜷缩在巨大的铜床上，抓狂地搜索着无线信号。融化的冰雹流下了冰水，渗透进窗沿，缓缓滴落。

时间是 2013 年 1 月，地点是埃里切（Erice）。这里是意大利西西里岛西南偏远角落一个山巅村落中的修道院，现在改造成了科学中心。整整一个星期，我都被监禁在这里，一起的还有其他 CERN 会员国代表、国际主要实验室的代表以及全球各种机构和合作方的代表，包括来自美国和日本的。在被释放之前，我们需要完成一份粒子物理欧洲战略部署的更新计划。有许多需要更新的地方。除了去年夏天（感觉已经非常、非常遥远）的希格斯玻色子大发现，耦合角 θ_{13} 的测量也是深刻影响中微子领域未来的巨大进展。

为了开展大型粒子物理项目并且最终有所收获，我们需要投入巨量时间和金钱。那些现在还不够上学年龄的小孩子将来会参与到数据的分析工作中，而现在作出决定的人甚至有可能活不到项目给出结果的时候。所以最重要的是基于一个战略部署作出正确的决定，并且一直坚持此决定，否则我们将一事无成。决定因素包括了许多参量和约束，也包括了各种消息灵通、先己后人的独立团体之间的争论，他们总是试图为自己以及挚爱的科学子领域谋求最佳权利。其中一些争论发生在熊熊炉火边，就着意大利面和红酒，在几个小餐厅里。主办方说服他们在这种淡季中仍为我们开放。我觉得这很有帮助。暖和的炉火边随意的餐饮，外面是嘶吼的天气，这无疑增进了我们的团队精神。而且当冰雹和浓雾消失的时候，埃里切还是非常美丽的。迷人的日落和从悬崖边放眼望去的景色增加了我们的远见。虽然我不确定马尔萨拉房中的吉他表演是否有帮助，但马尔萨拉葡萄酒肯定让我们受益匪浅。

LHC 长期更新计划尚未被核准通过，甚至尚未全部完成。日本有个严肃的提议，关于修建一个超导直线对撞机，他们很想知道欧洲的

态度——我们想要参与其中吗?我们能对它作出贡献吗?中微子领域也不甘落后,他们需要一个新的“远距离”中微子设施探究中微子如何振荡。现在已经知道 θ_{13} 非常大,所以我们有机会在中微子振荡中观察到物质–反物质不对称,或许这能更好地解释为什么大爆炸后我们没有很快湮灭。此外还有其他关于中微子的疑问,例如它们的反粒子是它们自己吗?

回到更高能量的话题,有些人提议对撞 μ 子。μ 子是电子的胖子版本,所以它既保留了电子的所有优点,又只有小得多的同步辐射(小 16 亿倍,因为它比电子重 200 倍)。此处的一个困难是,它在 2.2 微秒内就发生衰变。如果能够将它瞬间加速,狭义相对论时间膨胀原理将能解决此困难——高速运动时,时间流逝减慢,因此衰变时间变长。可惜这也很难办。μ 子对撞还有一个有用的副产物:μ 子衰变将释放中微子,所以强 μ 子束有可能成为强中微子束的绝佳来源,而且几乎免费。

最后,我们确定了四个优先级最高的项目。在会议的最后两天,我待在一个冰冷的房间中,坐在一个写着“英国”的三角形标签后面,和大家争论三页杰作中[①]的每一个词。为了致意此事以及对我的同事表示尊重,我将不再擅自描述,而是原原本本地将四个项目摘录于此:

> (c) 希格斯玻色子的发现开启了一个重大项目,即以可能达到的最高精确度测量此粒子的性质,验证标准模型的有效性,在能量最前沿寻找新物理。LHC 在此项目的实现中占据了独特位置。**欧洲的当务之急是开发 LHC 的全部潜力,包括机器和探测器的更高亮度升级,实现 2030 年左右收集的数据十倍**

① 所有内容都可以在此文件(http://cds.cern.ch/record/1551933)的最后四页中找到,文件于 2013 年 5 月在比利时布鲁塞尔正式签署。签署仪式本身是个精彩的活动,虽然我对它的记忆有些模糊。这全是因为在回旅馆的途中,我和我的同伴停下来喝了“几品脱”比利时啤酒。

于最初设计。此升级项目同样能够为味物理（flavour physics）和夸克－胶子等离子体的研究提供更多激动人心的机会。

(d) 为了能够处于粒子物理研究最前沿，在下一次战略升级之前，即以 14 TeV 能量运行的 LHC 开始输出物理结果时，欧洲应该主导提出一个远大的后 LHC 加速器项目。CERN 应该在全球背景下承担起加速器项目的设计工作，着重于质子－质子和正负电子高能最前沿机器。设计工作必须结合强大加速器的研发项目，包括强磁场和高梯度加速结构，借力于与全球其他国家研究所、实验室以及大学的合作。

(e) 基于强有力的科学证据，我们需要一台正负电子对撞机。它可以和 LHC 互补，以从未达到过的精度研究希格斯玻色子和其他粒子的性质，而且它的能量可以升级。国际直线对撞机（International Linear Collider，ILC）的技术性设计报告已经完成。日本粒子物理学界想要在日本修建 ILC 的积极意愿很受欢迎，而欧洲期盼着参与其中。欧洲期待着来自日本的提议，以便讨论可能的参与方式。

(f) 中微子振荡物理的快速发展（欧洲紧密参与其中）提供了一个强有力的科学证据，表明我们需要一个远距离中微子项目，以探索中微子领域中的 CP 破缺和质量阶层问题(hierarchy problem)。CERN 应该开展一个中微子项目，为将来欧洲在远距离实验中发挥重要角色铺平道路。欧洲应该考虑成为美国和日本的世界领先远距离中微子项目主要参与者的可能性。

摘录完毕。此外还有十几个段落，描述了一些小规模项目、组织事宜以及不受欢迎的“现实影响”。很显然，粒子物理事务繁忙。

9.9　科学的下一步

令我惊讶的是，在希格斯玻色子发现宣布后，英国媒体上几乎没有出现负面言论。我本来以为会出现一些类似“把钱花在一些我们完全无法理解的东西上简直就是浪费”的话。然而，在英国似乎有很大比例的公众认可 LHC 项目的重大意义，分享着整件事情的激动。它并非只是昙花一现之事（nine-day wonder）。[①]从 LHC 建造开始，到启动时的技术故障、后来的谣言和线索，再到 2012 年 7 月的惊喜以及最终的诺贝尔物理学奖，很多人都坚定地和我们站在一起。而英国的获奖者是谦虚而大方的彼得・希格斯，一个生活和工作于苏格兰的高地人（Geordie），这无疑是锦上添花。所有这些仅需要每人每年付出几英镑即可。在政治上，基础研究的经济状况似乎也有很大进步。虽然魔鬼都在实施细节中，但至少目前所有党派多数政治家对研究经费所使用的语言都很正面，而我希望也相信 LHC 鲜明的姿态对此起了作用。当然，我们需要持续性地对经济状况进行再制定和再审核。

另一个确实出现了的有趣批评是，物理已经偏离实验太远，而实验太受理论驱使；万有理论的寻找是支持着整整一代理论物理学家的一种执着，而他们还提不出什么可用实验检验的预测。即使在理论物理学界，这种批评也不算新颖。加拿大安大略省周界研究所（Perimeter Institute）的李・斯莫林（Lee Smolin）和美国哥伦比亚大学数学系的彼得・沃特（Peter Woit）在 2006 年分别出版了一本书，从他们的角度批判弦论。而作家吉姆・巴戈特（Jim Baggott）在希格斯玻色子发现正火热之时出版了新书《再见吧现实》（*Farewell to Reality*），也提出了相似的指责。

---

① 好吧，它确实在初次启动的九天（nine-day）之后发生故障，但那并非终结……

这些批评也不是没有道理。譬如现在理论粒子物理或许太集中于一个方向了——此处即弦论及其各种派生。类似事情以前也发生过。正如《卫报》记者伊恩·桑普尔在其《有质量的》一书中所描述的，当布劳特、恩格勒特、希格斯和其他人提出他们的想法时，S-矩阵理论正大行其道，而量子场论几乎无人问津，他们工作在主流之外。不过慢慢地，实验数据将主流引到了他们的方向。总要有一些人工作于各种分支,而重要的是不要聚集于同一分支——除非被实验数据引导。就我而言（仅仅是个人偏好），我更感兴趣于解决实际观测问题的分支（有很多此类分支），而非追求万有理论的分支。我不会非议后者，但我对理解当前宇宙的兴趣远大于推测一个多元宇宙。

LHC 也是一个很好的例子，解释理论物理学家为什么在各种不同方向研究问题，以及为什么他们必须如此。希格斯玻色子的提出是在将近五十年前，而 LHC 的建造耗费了十来年——如果算上研发时间，将近二十年。那是很长的一段等待时间。所以如果在那期间有一些人做些数学上的物理猜测研究，不仅不会带来任何坏处，或许反而会令我们受益良多。

在希格斯玻色子发现之后提出这些批评似乎有些奇怪。虽然部分理论物理学家多年以来早就默认希格斯玻色子的存在，但它存在的实验事实还是从根本上改变了这个领域，而 LHC 的结果将持续影响着粒子物理领域的发展。有关更高能新实验的讨论不仅依赖于理论洞察力，也依赖于技术和政治洞察力。我们不仅没有和现实说再见，这些新机器面临的技术和政治挑战还强迫我们和现实天天见，而实验数据也让我们更接近现实。

9.10　我的下一步

经历了两年的伦敦–日内瓦每周往返生活,几乎依靠着激情和航空食品存活，在 CERN 主持一个物理小组的同时在 UCL 上课、在伦敦生活，现在我终于决定，我的下一个管理职位需要和我的家庭在一个城市。

所以我答应成为 UCL 物理和天文系的主任。这是很有意义的工作，而且意味着（和多数学术圈要求专业技能的趋势相反）我需要拓宽自己的物理知识，以便于理解系里凝聚态物理、天体物理和原子物理学家所做之事。

不过,我的研究仍然会以 LHC 为中心。目前我的一个博士生伊内斯·奥乔亚（Inês Ochoa）即将完成 2012 年 ATLAS 数据中的希格斯玻色子–底夸克衰变结果,同时我们还有好几个准备中的项目,有关 2015 年的再次启动以及之后的升级。我还会回来的。

与此同时，我发觉应该写一本书记录物理学中的这段非凡时期。感谢你阅读至此，希望你能喜欢。

致　　谢

我要感谢很多人。

首先是我的家庭，每个成员。感谢他们容忍我经常性的缺席（精神上的和现实中的），以及为我欢呼为我加油。

感谢我的朋友和同事，其中一些人在这些事件中比我付出更多努力。有些人的名字已经在本书中提及，有些人还没有。对于那些本该被提及却被遗漏的人，我要说声抱歉；对于那些想要隐姓埋名却被提及的人，我也要说声抱歉。

还要感谢 UCL 和 CERN。它们给了我研究的自由，又允许我写下这本书。

我要感谢 Wordpress 网站、推特，尤其是《卫报》。它们为我提供了发表文章的地方以及写作对象。

非常感谢我的读者和我在网上遇到的许多人。他们对我的鼓励、质疑、教育和逗乐丰富了我的生活，尤其是在无聊的候机室时。感谢你们。

感谢我的文学代理戴安娜和我的出版商，尤其是西蒙（他其实并没有给我拟定一个相当愚蠢的书名）。

最后，感谢所有支持社会发展的纳税者。因为你们的支持，我们才能探索前沿知识。我竟然会撰写一些作者列表没有上百人的作品，真是不可思议。此书是我个人的拙作，但 LHC 的故事由上亿人写就。

图片版权说明

插页的彩图图表取自 CERN 各网站以及维基百科，遵从相应的使用条件。各图表的作者信息及出处说明如下：

彩图 1，译者利用 Google Earth 及以下两张图片重新绘制，http://www-hep.phys.cmu.edu/cms/PICT_ARCH/lhc_cros_points.gif，http://public.web.cern.ch/public/features/0910_LHC_cold.gif；

彩图 2，http://te-dep-epc-hpc-section.web.cern.ch/te-dep-epc-hpc-section/machines/pagesources/Cern-Accelerator-Complex.jpg；

彩图 3，ATLAS Experiment © 2010 CERN，http://cds.cern.ch/record/1297970；

彩图 4，ATLAS Experiment © CERN，http://inspirehep.net/record/878496/files/figures_AtlasDetectorLabelled.png；

彩图 5，ATLAS Experiment © CERN，https://cds.cern.ch/record/1505342；

彩图 6，ATLAS Experiment © 2014 CERN，http://www.atlas.ch/photos/atlas_photos/selected-photos/events/TwoElectronTwoMuon.png；

彩图 7，MissMJ 绘，译者翻译，https://commons.wikimedia.org/wiki/

File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg；

彩图 8，https://en.wikipedia.org/wiki/Fundamental_interaction，译者翻译，有修改。

乔恩·巴特沃思

（Jon Butterworth）

伦敦大学学院（UCL）物理学教授、物理和天文系主任，现工作于CERN大型强子对撞机（LHC）的ATLAS实验。

他成长于英国曼彻斯特市，1989年从牛津大学本科毕业（物理学），1992年获得牛津大学博士学位（高能物理学）。随后在美国宾夕法尼亚州立大学的资助下，他在德国汉堡DESY强子－电子环形加速器（HERA）的ZEUS实验进行博士后研究。1995年，他加入UCL，并继续在ZEUS工作，直到2008年。此后，他带领一个UCL团队，工作于ATLAS实验，并先后担任过ATLAS蒙特卡罗小组和ATLAS标准模型小组的召集人。

他个人的研究主要集中在LHC上有关电弱对称性破缺的物理过程，包括对希格斯玻色子的搜寻。他和合作者首次提出，通过强子喷注的次级结构寻找高速运动粒子衰变的方法同样也能运用于希格斯玻色子的搜寻。2013年，他"因在高能粒子物理，尤其在理解强子喷注方面先驱性的实验和唯象理论工作"而荣获英国物理学会的查德威克奖章。

除了教学和研究工作，他还曾担任主管科研经费分配的英国科学和技术设施理事会（STFC）下设科学委员会的成员以及CERN的英国代表团的成员。他也积极致力于与政府和公众的科学沟通和传播，包括举办讲座、参与媒体节目、在《卫报》开辟博客（"Life and Physics"）以及拍摄系列纪录片《对撞的粒子》（*Colliding Particles*）等。

封面设计 | 83720326@qq.com
自在书装设计

你可以把这本书看作是希格斯粒子发现的回忆录，也可以视为巴特沃思教授那段工作岁月的记事簿，还可以把它当作介绍粒子物理的科普书……本书语言通俗而严谨，通过带领读者“游览”CERN、“观察”探测器内部结构、“参加”世界各地的大小会议等方式，讲解粒子物理的基本知识和当今高能物理实验的研究现状，走进一位粒子物理学家的生活，和他一起感受LHC的魅力，理解和探索粒子物理之美。

——乔从丰，中国科学院大学物理科学学院教授

现有的关于2012年7月CERN大发现的来龙去脉的通俗描述，大多数出自外部人士之手，并大多从理论的视角切入。而乔恩·巴特沃思是一位实验物理学家，他首次从一位内部人士的视角生动描述了发现的整个过程。

——彼得·希格斯，2013年诺贝尔物理学奖获得者

一位CERN实验物理学家对其生活和工作的惹人喜爱的描述……他解释了他和同事为何会对亚原子世界如此好奇，并让我们得以一窥现代物理实验大型国际合作项目中的生活。在书中，我们将跟随他前往CERN，参加众多会议，接受一次约翰·汉弗莱斯的采访，并在世界各地参加各种学术会议。

——格雷姆·法米罗，《量子怪杰：保罗·狄拉克传》作者

这是一本极不寻常的书，它把握住了过去二十多年粒子物理的起起伏伏（它们最终引向希格斯玻色子的发现）。乔恩是我的老朋友——他是一位有见地、有创造性、说话委婉但偶尔也直言不讳的物理学家，而他性格的方方面面在这本写得很好的书中都得以展现。如果你想了解身为一位职业科学家究竟是什么样子的，请读这本书。

——布赖恩·考克斯，《宇宙的奇迹》《太阳系的奇迹》《生命的奇迹》作者

图灵社区：www.ituring.cn
新浪微博：@图灵教育 @图灵社区 @图灵新知
微信公众号：turingbooks ituring_interview
反馈/投稿/推荐邮箱：contact@turingbook.com
读者热线：(010) 51095186-600
分类建议 科普读物/数理化
人民邮电出版社网址：www.ptpress.com.cn



ISBN 978-7-115-40546-3
定价：39.00元

看完了

如果您对本书内容有疑问，可发邮件至contact@turingbook.com，会有编辑或作译者协助答疑。也可访问图灵社区，参与本书讨论。

如果是有关电子书的建议或问题，请联系专用客服邮箱：ebook@turingbook.com。

在这里可以找到我们：

微博 @图灵教育 : 好书、活动每日播报
微博 @图灵社区 : 电子书和好文章的消息
微博 @图灵新知 : 图灵教育的科普小组
微信 图灵访谈 : ituring_interview，讲述码农精彩人生
微信 图灵教育 : turingbooks